

SÉRIE A, N° 1662

N° D'ORDRE : 2528

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES-PHYSIQUES

PAR

Dragolioub MILOSAVLIEVITCH

INGÉNIEUR, LICENCIÉ ÈS SCIENCES
ASSISTANT A L'UNIVERSITÉ DE BEOGRAD.

1^{re} THÈSE :

**Sur la méthode de la résonance de tension d'un
circuit oscillant appliquée à la mesure de la
constante diélectrique des liquides.**

2^e THÈSE :

Proposition donnée par la Faculté.

Soutenues le 8 JUIL 1936 juillet 1936 devant la commission d'examen :

Président : M. A. COTTON.

Examineurs : { M. E. DARMOIS.
M. F. CROZE.

PARIS

IMPRIMERIE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

JOUVE & C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1936

SÉRIE A, N° 1662

N° D'ORDRE : 2528

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES-PHYSIQUES

PAR

Dragolioub MILOSAVLIEVITCH

INGÉNIEUR, LICENCIÉ ÈS SCIENCES
ASSISTANT A L'UNIVERSITÉ DE BEOGRAD.

1^{re} THÈSE :

**Sur la méthode de la résonance de tension d'un
circuit oscillant appliquée à la mesure de la
constante diélectrique des liquides.**

2^e THÈSE :

Proposition donnée par la Faculté.

Soutenues le juillet 1936 devant la commission d'examen :

Président : M. A. COTTON.

Examineurs : { M. E. DARMOIS.
 { M. F. CROZE.

PARIS

IMPRIMERIE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

JOUVE & C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1936

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire . . . M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

<i>Professeurs honoraire</i>	(	H. LE CHATELIER.	LÉON BRILLOUIN.	AUGER.
		H. LEBESGUE.	GOURSAT.	BLAISE.
		A. FERNBACH.	WALLERANT.	DANGEARD.
		A. LEDUC.	GUILLET.	JANET.
		Émile PICARD.	PÉCHARD.	LESPIEAU.
		Rémy PERRIER.	FREUNDLER.	MARCHIS.
				VESSIOT.

PROFESSEURS

G. BERTRAND.	T	Chimie biologique.	L. JOLEAUD	Paléontologie.
M. CAULLERY.	T	Zoologie (Évolution des êtres organisés).	ROBERT-LÉVY.	Zoologie.
G. URBAIN.	T	Chimie générale.	F. PICARD	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
Émile BOREL.	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	Henri VILLAT.	T Mécanique des fluides et applications.
Jean PERRIN.	T	Chimie physique.	Ch. JACOB	T Géologie.
H. ABRAHAM.	T	Physique.	P. PASCAL	T Chimie minérale.
E. CARTAN.	T	Géométrie supérieure.	M. FRÉCHET	T Calcul différentiel et Calcul intégral.
M. MOLLIARD.	T	Physiologie végétale.	E. ESCLANGON.	T Astronomie.
L. LAPICQUE.	T	Physiologie générale.	M ^{me} RAMART-LUCAS	T Chimie organique.
A. COTTON.	T	Recherches physiques.	H. BÉGHIN.	T Mécanique physique et expérimentale.
J. DRACH	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	FOCH	Mécanique expérimentale des fluides.
Charles FABRY	T	Enseignement de Physique.	PAUTHENIER	Physique (P. C. B.).
Charles PÉREZ	T	Zoologie.	De BROGLIE	T Théories physiques.
Léon BERTRAND.	T	Géologie structurale et géologie appliquée.	CHRÉTIEN	Optique appliquée.
P. PORTIER.	T	Physiologie comparée.	P. JOB.	Chimie générale.
E. RABAUD.	T	Biologie expérimentale.	LABROUSTE.	Physique du Globe.
M. GUICHARD.		Chimie minérale.	PRENANT.	Zoologie.
Paul MONTEL.	T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	VILLEY.	Mécanique physique et expérimentale.
P. WINTREBERT.	T	Anatomie et histologie comparées.	BOHN	Zoologie (P. C. B.).
L. BLARINGHEM.	T	Botanique.	COMBES	Botanique (P. C. B.).
O. DUBOSCQ	T	Biologie maritime.	GARNIER.	T Mathématiques générales.
G. JULIA.	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	PÈRÈS.	Mécanique théorique des fluides.
C. MAUGUIN	T	Minéralogie.	HACKSPILL.	Chimie (P. C. B.).
A. MICHEL-LÉVY.	T	Pétrographie.	LAUGIER.	Physiologie générale.
H. BÉNARD.	T	Mécanique expérimentale des fluides.	TOUSSAINT.	Technique Aéronautique.
A. DENJOY.	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	M. CURIE.	Physique (P. C. B.).
L. LUTAUD.	T	Géographie physique et géologie dynamique.	G. RIBAUD.	T Hautes températures.
Eugène BLOCH	T	Physique théorique et physique céleste.	CHAZY.	T Mécanique rationnelle.
G. BRUHAT.		Physique.	GAULT.	Chimie (P. C. B.).
E. DARMOIS		Enseignement de Physique.	CROZE	Recherches physiques.
A. DEBIERNE.	T	Physique Générale et Radioactivité.	DUPONT	T Théories chimiques.
A. DUFOUR.	T	Physique (P. C. B.).	LANQUINE	Géologie.
L. DUNOYER.		Optique appliquée.	VALIRON.	Mathématiques générales.
A. GUILLIERMOND.	T	Botanique.	BARRABÉ.	Géologie structurale et géologie appliquée.
M. JAVILLIER.		Chimie biologique.	MILLOT.	Zoologie (P. C. B.).
			F. PERRIN.	Théories physiques.
			VAYON.	Chimie organique.
			G. DARMOIS	Calcul des Probabilités et Physique-Mathématique.

Secrétaire. A. PICAUD

Secrétaire honoraire D. TOMBECK.



A MONSIEUR LE PROFESSEUR CH. FABRY,
Membre de l'Institut.

*Hommage respectueux et re-
connaissant.*

A MONSIEUR LE PROFESSEUR E. DARMOIS

En témoignage de vive gratitude pour les conseils et les encouragements qu'il a bien voulu me donner au cours de ce travail.

SUR LA MÉTHODE DE LA RÉSONANCE DE TENSION D'UN CIRCUIT OSCILLANT APPLIQUÉE A LA MESURE DE LA CONSTANTE DIELECTRIQUE DES LIQUIDES.

INTRODUCTION

La méthode de la résonance de tension d'un circuit oscillant a été appliquée à un grand nombre de travaux dont la plupart seront mentionnés au cours du présent travail. Ce qui distingue ces travaux, c'est l'indicateur de la résonance de tension. Le plus simple, c'est d'insérer dans le circuit oscillant un thermo-couple muni d'un galvanomètre, mais l'amortissement des oscillations électriques est considérable. Très souvent, on est obligé de faire l'amplification avant d'utiliser l'indicateur de la résonance, ce qui donne lieu à l'augmentation du nombre des circuits électriques et, par conséquent, à la complexité de l'ensemble des phénomènes en ce qui concerne la mise en équations des différentes quantités.

Nous avons envisagé un montage qui permet de considérer à la fois le circuit oscillant et son indicateur de tension. Nous avons fait une étude complète de ce montage et l'avons appliqué à la mesure des constantes diélectriques des liquides.

Nous diviserons notre étude en six chapitres :

- I. — Résonance de tension d'un circuit oscillant.
- II. — Détection par la courbure de grille d'une lampe à trois électrodes.
- III. — Résonance de la tension du circuit oscillant

inséré dans le circuit de grille d'une lampe à trois électrodes.

IV. — Montages et appareils.

V. — Étude succincte de quelques montages basés sur la méthode de la résonance de tension.

VI. — Mode opératoire et quelques résultats de mesure.

CHAPITRE PREMIER

RÉSONANCE DE TENSION D'UN CIRCUIT OSCILLANT

1^o **Circuit oscillant ordinaire.** — Considérons un circuit oscillant formé d'un condensateur de capacité C et d'une bobine de self-induction L et de résistance R . La bobine est le siège d'une force électromotrice induite $e = A \sin \omega t$. Nous supposons que le courant est le même en tous les points du circuit. L'amplitude de la tension aux bornes de la capacité C est donnée par :

$$U^2 = \frac{A^2}{R^2 C^2 \omega^2 + (L C \omega^2 - 1)^2} \quad (1)$$

La valeur maxima de U , si C est la seule variable, sera pour :

$$C = C_m = \frac{L}{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (2)$$

ce qui donne :

$$U_m^2 = \frac{R^2 + L^2 \omega^2}{R^2} \cdot A^2 \quad (3)$$

La résonance du courant donne :

$$\left. \begin{aligned} C'_m &= \frac{1}{L \omega^2} \\ U'_m &= \frac{L \omega}{R} \cdot A \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

En général, R^2 peut être négligé devant $L^2\omega^2$. Les résonances de tension et de courant ont alors lieu pour la même valeur de C , et les tensions sont presque égales.

L'équation de la courbe de résonance de tension est :

$$y = \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 = \frac{1}{\frac{\pi^2}{\delta^2} \left(\frac{C}{C_m} - 1 \right)^2 + 1} = F(C)$$

où $\delta = \pi \frac{R}{L\omega}$ est le décrement logarithmique.

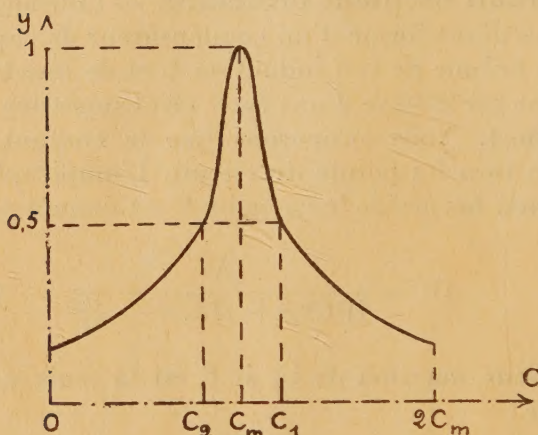


FIG. 1.

La courbe $y = F(C)$ est symétrique par rapport à la droite $C = C_m$ (fig. 1). Désignant par C_1 et C_2 les capacités correspondant à $y = 0,5$, le décrement logarithmique est donné par :

$$\frac{\delta}{\pi} = \frac{C_1 - C_2}{2C_m} \quad (5)$$

ou $C_1 > C_2$.

2° Circuit oscillant avec la capacité shuntée par une résistance. — Considérons le circuit de la figure 2 dont la bobine est le siège de la force électromotrice

induite $e = A \sin \omega t$. L'étude de ce circuit a été faite par M. Jezewski [1] et nous allons donner les résultats prin-

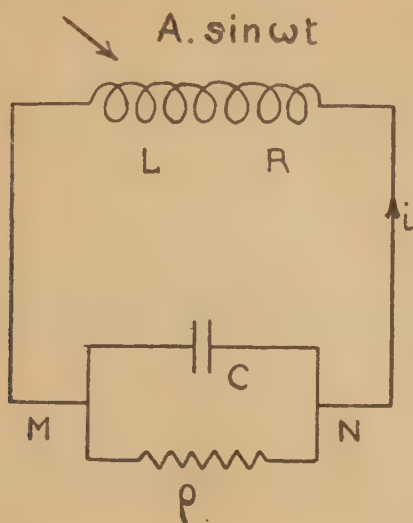


FIG. 2.

cipaux. La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$U^2 = \frac{A^2}{(R^2 + L^2 \omega^2) \left(C^2 \omega^2 + \frac{1}{\rho^2} \right) + 1 + \frac{2R}{\rho} - 2LC\omega^2} \quad (6)$$

Si C est la seule variable, la valeur maximum de U sera pour :

$$C = C_m = \frac{L}{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (7)$$

La formule nous montre que C_m est indépendante de la résistance de fuite ρ . Il semble que ce fait fut annoncé pour la première fois par F. Tank [2]. La valeur maximum de U est :

$$U_m = \frac{A}{\frac{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}{\rho} + \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}} \quad (8)$$

La résonnance du courant i sera pour :

$$C'_m = \frac{1}{2} \frac{1}{L\omega^2} \left(1 + 2 \frac{R}{\rho} \right) \left[1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{L\omega}{\rho + 2R} \right)^2} \right] \quad (9)$$

Quand on peut négliger le terme en $\frac{R}{\rho}$ et $\frac{L^3\omega^2}{\rho^4}$, $\frac{L^5\omega^4}{\rho^6}$, etc.
on aura :

$$C'_m = \frac{1}{L\omega^2} + \frac{L}{\rho^2} \quad (9 \text{ bis})$$

3° Circuit oscillant avec capacité shuntée par une capacité de fuite et une self-induction mises

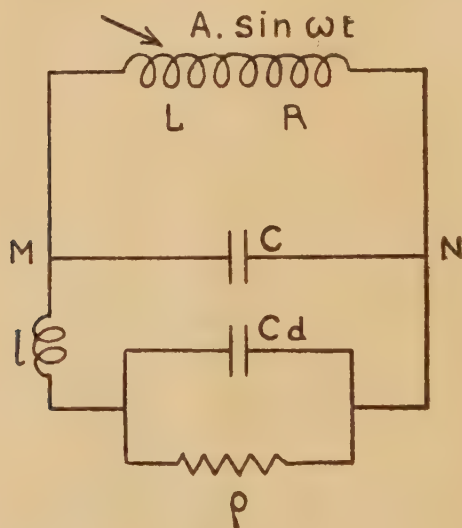


FIG. 3.

en série. — Pour que l'on puisse tenir compte de la self-induction provenant des fils de jonction dans la réalisation du circuit oscillant, il faut considérer le circuit sur la figure 3. Désignons par l la self-induction provenant des fils de jonction. L'impédance de la dérivation

constituée par le condensateur de fuite C_d et ses fils de jonction est :

$$\frac{\rho}{1 + \rho^2 C_d^2 \omega^2} + j \left(l\omega - \frac{\rho^2 C_d \omega}{1 + \rho^2 C_d^2 \omega^2} \right) \quad (10)$$

Si l'on cherche à déterminer les valeurs fictives d'une résistance x et d'une capacité y associées en parallèle et

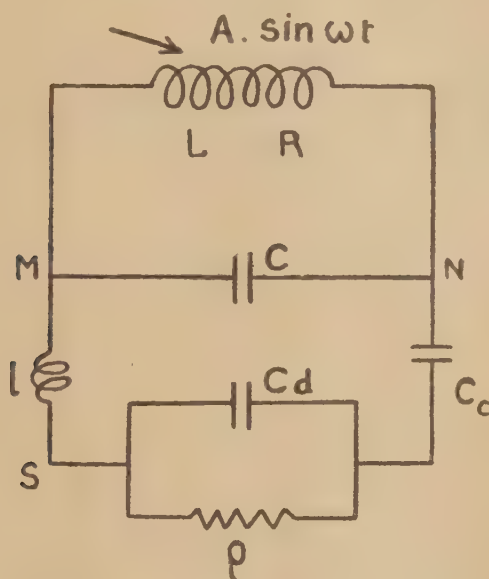


FIG. 4.

telles que l'impédance résultante soit la même que celle qui précède, on aura [3] :

$$\left. \begin{aligned} x &= \rho (1 - C_d l \omega^2)^2 + \frac{l^2 \omega^2}{\rho} \\ y &= \frac{C_d - \frac{l}{\rho^2 (1 - C_d l \omega^2)^2}}{1 - C_d l \omega^2 + \frac{l^2 \omega^2}{\rho^2 (1 - C_d l \omega^2)}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Quand on peut négliger les termes $C_d l \omega^2$ et $\frac{l^2 \omega^2}{\rho^2}$ devant l'unité, on obtient :

$$x = \rho + \frac{l^2 \omega^2}{\rho}, \quad y = C_d - \frac{l}{\rho^2} \quad (12)$$

La détermination de la self-induction l des fils de jonction est assez délicate. Aussi préférons-nous la compenser par une grande capacité C_c (fig. 4) telle qu'on ait : $l C_c \omega^2 = 1$ (13).

Désignant par C_m la capacité correspondant à la résonance de tension entre les points M et N (fig. 4), on aura d'après la formule (7) :

$$C_m + C_d = \frac{L}{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (14)$$

à la condition que l'équation (13) soit satisfaite.

CHAPITRE II

DÉTECTION PAR LA COURBURE DE GRILLE D'UNE LAMPE A TROIS ÉLECTRODES

4^o Rappel des définitions des capacités et des coefficients d'influences électrostatiques. — Considérons un système de conducteurs placés dans une région de l'espace ne contenant pas de charges électriques. Soient $V_1, V_2, \dots, V_n$ les potentiels et $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ les charges correspondantes. Les charges de ces conducteurs sont données [4] par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{11}V_1 + C_{12}V_2 + \dots + C_{1n}V_n, \\ Q_2 &= C_{21}V_1 + C_{22}V_2 + \dots + C_{2n}V_n, \\ Q_n &= C_{n1}V_1 + C_{n2}V_2 + \dots + C_{nn}V_n, \end{aligned}$$

où les C désignent des constantes. Les constantes $C_{11}, C_{22}, \dots, C_{nn}$ s'appellent des capacités et les autres des coefficients d'influences électrostatiques. Rappelons que les valeurs des capacités et des coefficients d'influences électrostatiques dépendent de l'existence et de la position de tous les conducteurs. La capacité d'un conducteur en présence d'autres conducteurs est différente de la capacité du même conducteur seul dans l'espace.

Considérons maintenant un système de trois conducteurs placés dans un espace contenant des charges électriques. C'est le cas des conducteurs qui forment les électrodes d'un tube électronique (fig. 5). Pour un chauffage donné du filament, une tension constante v

de plaque et des petites variations de la tension u de grille autour de la même valeur, la charge spatiale peut

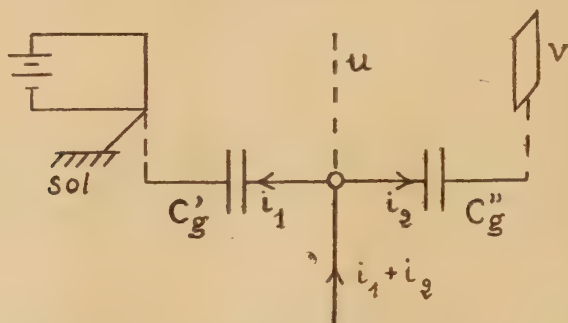


FIG. 5.

être considérée indépendante du temps. Les charges électriques du filament Q_f , de la grille Q_g et de la plaque Q_p sont données par les équations :

$$\begin{aligned} Q_f &= C_f \cdot O + C_{fg} \cdot u + C_{fp} \cdot v \\ Q_g &= C_{gf} \cdot O + C_g \cdot u + C_{gp} \cdot v \\ Q_p &= C_{pf} \cdot O + C_{pg} \cdot u + C_p \cdot v \end{aligned}$$

où C_f , C_g et C_p sont des capacités et C_{fg} , C_{fp} , ... des coefficients d'influence électrostatique. Les capacités et les coefficients d'influence électrostatique dépendent non seulement de l'existence et de la position de toutes les trois électrodes, mais aussi des charges spatiales.

Si la tension de grille u subit seule de petites variations autour d'une valeur constante, on a :

$$dQ_f = C_{fg} \cdot du, \quad dQ_g = C_g \cdot du, \quad dQ_p = C_{pg} \cdot du$$

D'autre part, on peut écrire : $dQ_g = (i_1 + i_2) \cdot dt$ où $i_1 + i_2$ est le courant de grille à l'instant t . On a donc :

$$i_1 + i_2 = C_g \cdot \frac{du}{dt} \quad (15)$$

Il faut bien remarquer que C_g représente la capacité de grille en présence de deux autres électrodes et de la

charge spatiale. Cette capacité peut être considérée comme la somme de deux capacités : filament-grille C'_g et grille-plaque C''_g telles qu'on ait :

$$i_1 = C'_g \cdot \frac{du}{dt} \text{ et } i_2 = C''_g \cdot \frac{du}{dt} \quad (16)$$

5° Caractéristique de grille à tension de plaque constante. — Considérons une lampe à trois électrodes. Maintenons la tension de plaque v constante et faisons varier la tension de grille u . Le courant dans le circuit de grille sera la somme algébrique [5] de :

1° Courant d'isolement (fig. 6 a); ce courant provient

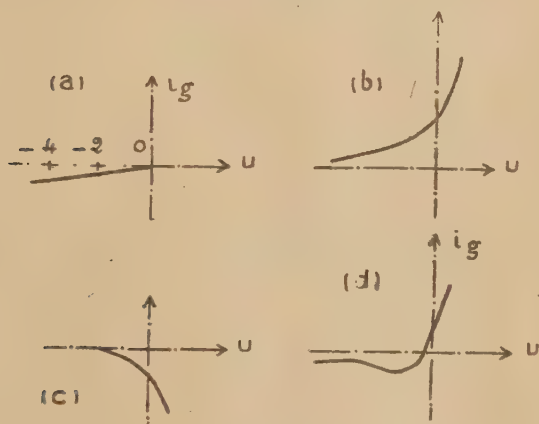


FIG. 6.

du fait que l'isolement entre le filament et la grille n'est pas rigoureusement parfait. Le sens du courant positif est celui de la grille au filament. Le courant d'isolement est à peu près proportionnel à la différence de tension entre le filament et la grille.

2° Courant électronique (fig. 6 b); une partie des électrons émis par le filament est captée par la grille. Ce courant commence, selon la lampe, pour $u = -1$ volt jusqu'à $u = -3$ volts;

3° Courant d'ionisation (fig. 6 c); ce courant est dû à la présence de traces de gaz dans l'ampoule. Il croît rapidement avec la tension de grille u .

Le courant total dans le circuit de grille est représenté par la figure 6 (d). La figure 7 représente la carac-

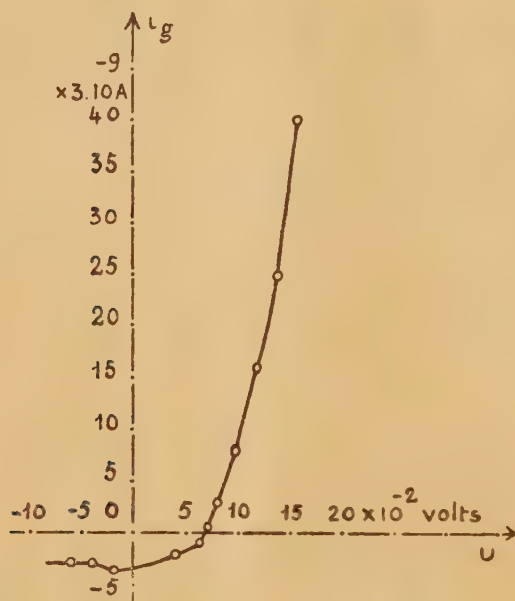


FIG. 7.

téristique de grille à tension de plaque $v = 80$ volts de la lampe qui nous a servi pour nos mesures de la constante diélectrique. Le courant pour des potentiels de grille positifs tout près de zéro et négatifs s'annule et s'inverse. Ce courant inversé est dû à un transport de charges positives (courant d'ionisation) entre le filament et la grille [6].

6° **Détection par la courbure de grille.** — Nous nous proposons [7] de trouver la tension u de grille d'une lampe à trois électrodes en fonction du temps t ,

Après l'élimination de $i, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5$ et u_1 on arrive à l'équation :

$$rC.A\omega\cos\omega t + A.\sin\omega t = \\ r(C + C'_g + C''_g) \cdot \frac{du}{dt} + u + r.f(u) - u^0_b.$$

En posant :

$$\left. \begin{array}{l} rC.A\omega = B.\sin\varphi \\ A = B.\cos\varphi \end{array} \right\} \begin{array}{l} B = A.\sqrt{1 + r^2C^2\omega^2} \\ \operatorname{tg}\varphi = rC\omega, \end{array} \quad (17)$$

on aura :

$$B.\sin(\omega t + \varphi) = r(C + C'_g + C''_g) \cdot \frac{du}{dt} + u + r.f(u) - u^0_b \quad (18)$$

La tension u est une fonction périodique du temps t et peut-être représentée par la série de Fourier :

$$u = u^0 + \varepsilon + U.\sin(\omega t + \varphi) + U_2.\sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots,$$

u^0 désignant la tension de grille avant l'arrivée du signal $A.\sin\omega t$; , $U, U_2, \varphi, \varphi_2, \dots$ constantes à déterminer. La tension u_0 est déterminée par l'équation :

$$u_0 + r.f(u_0) - u^0_b = 0 \quad (19)$$

ou par l'intersection des courbes :

$$i_3 = f(u) \text{ et } i_3 = -\frac{1}{r}.u + \frac{u^0_b}{r} \quad (20)$$

Il est difficile de résoudre l'équation (18) dans le cas général. Nous allons distinguer deux cas : *a*) signal très faible (A très petit) et *b*) signal faible ou fort. Dans le second cas, nous résoudrons l'équation (18) graphiquement par la méthode des isoclines. Nous remarquons que pour les signaux forts, la charge spatiale, peut-être, ne sera plus constante avec le temps ni, par conséquent, les capacités filament-grille C'_g et grille-plaque C''_g . Quand même la résolution de l'équation (18) peut nous

donner, au moins qualitativement, la tension de grille en fonction du temps.

a) *Signal très faible.* — Dans ce cas, on peut admettre, avec une approximation suffisante, pour u l'expression :

$$u = u^0 + \varepsilon + U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (21)$$

Pour nous rendre compte de la justification de cette hypothèse, il suffit de comparer les expressions :

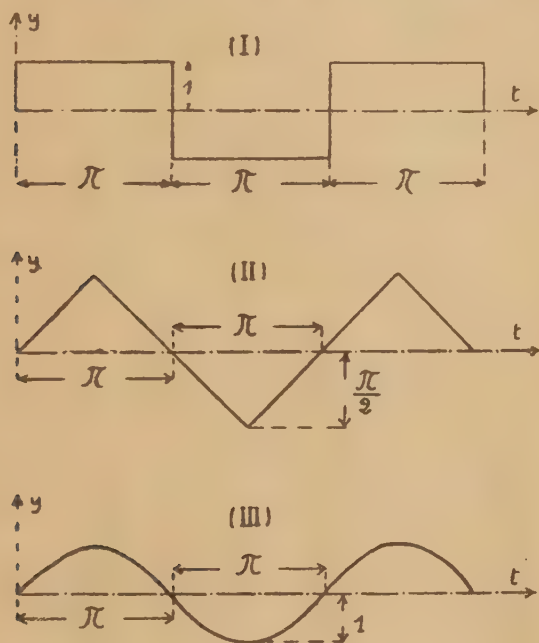


FIG. 9.

$$y = \frac{2}{\pi} \left[\sin t + \frac{1}{3} \sin 3t + \frac{1}{5} \sin 5t + \dots \right], \quad (I)$$

$$y = \frac{4}{\pi} \left[\sin t + \frac{1}{3^2} \sin 3t + \frac{1}{5^2} \sin 5t + \dots \right], \quad (II)$$

$$y = \sin t, \quad (III)$$

qui représentent les courbes sur la figure 9, la troisième étant une sinusoïde. Dans l'équation (18) u représente

une grandeur physique, la courbe qui représente u en fonction du temps, n'aura donc pas des points singuliers avec deux tangentes. La solution graphique nous montrera aussi qu'elle sera à très peu près une sinusoïde, quand le signal est faible, de l'ordre de quelques centièmes de volts.

Maintenant, on peut écrire :

$$f(u) = f(u_0) + [\varepsilon + U \cdot \sin(\omega t + \psi)] \cdot f'(u_0) + \\ + \frac{1}{2} \left[\varepsilon + U \cdot \sin(\omega t + \psi) \right]^2 \cdot f''(u_0) + \dots$$

ou, en négligeant les termes en ε^2 , ε^3 , εU , U^3 ,

$$f(u) = f(u_0) + f'(u_0) \cdot \varepsilon + f'(u_0) \cdot U \cdot \sin(\omega t + \psi) + \\ + \frac{1}{2} \cdot f''(u_0) \cdot U^2 \cdot \sin^2(\omega t + \psi)$$

De même, on a :

$$\frac{du}{dt} = U \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \psi)$$

Après avoir remplacé dans (18) u , $\frac{du}{dt}$ et $f(u)$ par les valeurs ci-dessus, nous avons obtenu :

$$\left. \begin{aligned} & [M \cdot U \cos \psi - N \cdot U \sin \psi - B \cos \varphi] \cdot \sin \omega t \\ & + [M \cdot U \sin \psi + N \cdot U \cos \psi - B \sin \varphi] \cdot \cos \omega t \\ & + [M \cdot \varepsilon + \frac{1}{2} r f''(u_0) \cdot U^2 \sin^2(\omega t + \psi)] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

M et N désignant :

$$M = r f'(u_0) + 1, \quad N = r \omega (C + C'_g + C''_g) \quad (23)$$

En multipliant successivement l'équation (22) par dt , $\sin \omega t \cdot dt$ et $\cos \omega t \cdot dt$ et en faisant l'intégration entre les limites 0 et $T = \frac{2\pi}{\omega}$, on arrive aux équations :

$$\left. \begin{aligned} 4M.\varepsilon + rf''(u_0).U^2 &= 0 \\ M.U\cos\varphi - N.U\sin\varphi &= B\cos\varphi \\ M.U\sin\varphi + N.U\cos\varphi &= B\sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

On tire aisément de (24) :

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= \frac{M\sin\varphi - N.\cos\varphi}{M\cos\varphi + N.\sin\varphi}, \quad U = mA \\ \varepsilon &= -\frac{\frac{U^2}{2} \cdot \frac{f''(u_0)}{2}}{\frac{1}{r} + f'(u_0)}, \quad \text{où } m^2 = \frac{1 + r^2 C^2 \omega^2}{M^2 + N^2} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

L'expression pour la baisse de tension diffère de la formule classique par le facteur m^2 qui est de l'ordre de 0,7 pour :

$$\begin{aligned} C &= 50\mu\mu F, \quad C'_g + C''_g = 10\mu\mu F, \quad r = 5.10^6 \text{ ohms}, \\ u_0^B &= 4 \text{ volts}, \quad \omega = 10^6 \text{ sec}^{-1} \text{ et} \\ f(u) &= (8u^2 + 8u + 2).10^{-6} \text{ amp. pour } u \gg -0,5 \text{ volt.} \end{aligned}$$

b) *Signal faible ou fort.* — L'équation (18) étant du premier ordre, peut être résolue graphiquement dans tous les cas par la méthode des isoclines. Il n'est même pas nécessaire de connaître l'expression algébrique pour la caractéristique de grille; il suffit de tracer préalablement la courbe $i_3 = f(u)$, en mesurant directement u et i_3 . A titre d'exemple, nous avons résolu graphiquement l'équation (18) dans deux cas, prenant pour $f(u)$:

$f(u) = (8u^2 + 8u + 2).10^{-6}$ amp. pour $u > -0,5$ volt
et $f(u) = 0$ pour $u \leq -0,5$ volt.

PREMIER EXEMPLE :

$$\begin{aligned} C &= 50\mu\mu F, \quad C'_g + C''_g = 10\mu\mu F, \quad r = 4.10^6 \text{ ohms}, \\ u_0^B &= 4 \text{ volts}, \quad A = 0,1 \text{ volt}, \quad \omega = 10^6 \text{ sec}^{-1}. \end{aligned}$$

On trouve de (17) :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= rC\omega = 200, \quad \varphi = 89^\circ 43' \\ B &= 20 \end{aligned}$$

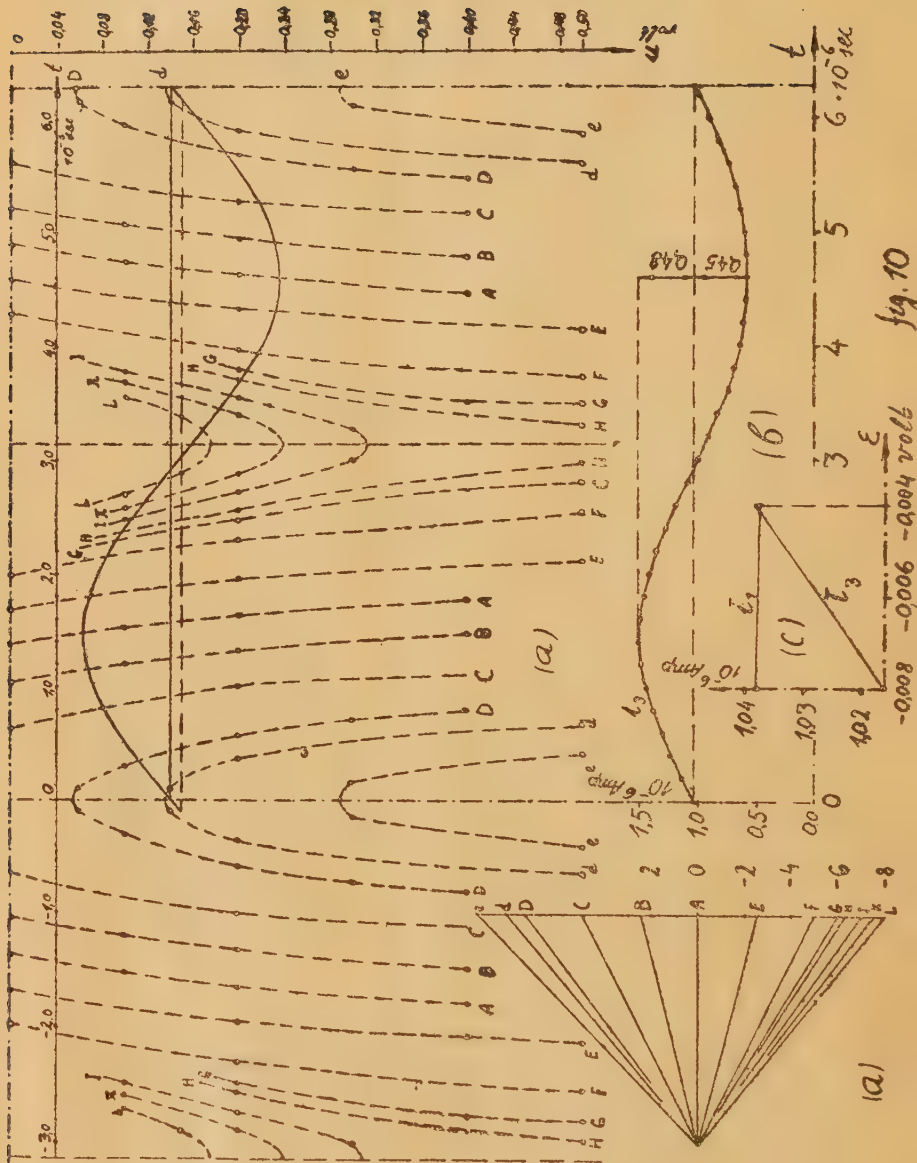


fig. 10

-0.008 -0.006 -0.004 volt

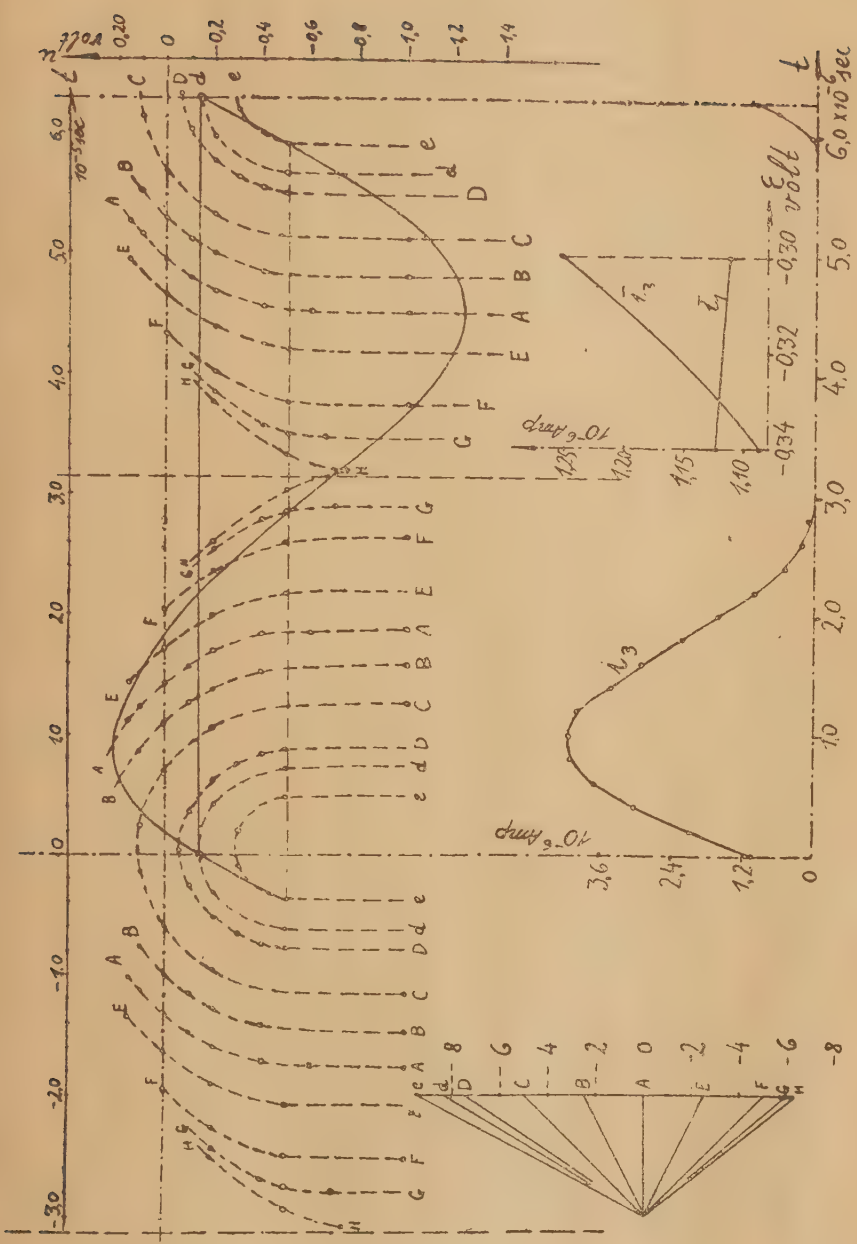


fig. 17

L'équation (18) devient :

$$\left. \begin{aligned} 20.\sin(\omega t + \varphi) = \\ 2,4.10^{-4} \cdot \frac{du}{dt} + u + 4.10^6.f(u) - 4 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Nous avons tracé (fig. 10_a) pour l'équation (26) les isoclines suivants :

	A	B	C	D	d	
$\frac{du}{dt} =$	O	2,5	5,0	7,5	$8,33 \times 10^4$	$\frac{\text{volt}}{\text{sec}}$
	e	E	F	G	H	
$\frac{du}{dt} =$	9,5	— 2,5	— 5,0	— 6,0	$— 6,35 \times 10^4$	$\frac{\text{volt}}{\text{sec}}$
		I	K	L		
$\frac{du}{dt} =$		— 7,0	— 7,5	$— 8,0 \times 10^4$		$\frac{\text{volt}}{\text{sec}}$

Partant du point initial $t = 0$ et $u_0 = -0,14$ volt (u_0 est l'intersection de la caractéristique de grille $i_3 = f(u)$ avec la droite $u_0 = r_{i_3} + u$) et traçant les droites qui coupent les isoclines d, D, C, ... sous la pente correspondante, on obtient la courbe représentant la tension de grille en fonction du temps. Cette courbe $u = F(t)$ est sensiblement une sinusoïde. La valeur moyenne est $-0,148$ volt, d'où l'on tire la baisse de tension de grille $\varepsilon_1 = -0,008$ volt. La formule (25) donne $\varepsilon = -0,0046$ volt. Cette différence provient du fait que la courbe $u = F(t)$ est tracée pour le premier cycle. A cause du régime transitoire, elle subit un déplacement quasi-translatoire dans la direction des ordonnées. La valeur exacte de ε , correspondant au régime permanent, peut être trouvée de la façon suivante : pour $\varepsilon = -0,008$ volt et pour les différentes valeurs du temps t pendant le premier cycle, on tire de $u = F(t)$ les valeurs correspondantes de u et de $i_3 = f(u)$; on trace la courbe i_3 en fonction de t (fig. 10 b)

ce qui nous donne la valeur moyenne $\bar{i}_3 = 1,016 \cdot 10^{-6}$ amp. On trouvera aussi, pour $\varepsilon = -0,008$ volt,

$$\bar{i}_1 = f(u_0) - \frac{\varepsilon}{r} = 1,039 \cdot 10^{-6} \text{ amp.}$$

On prendra ensuite $\varepsilon = -0,004$ volt, c'est-à-dire on soulèvera la courbe $u = F(t)$ de 0,004 volt et l'on trouvera de nouveau :

$$\bar{i}_3 = 1,037 \cdot 10^{-6} \text{ amp. et } \bar{i}_1 = 1,038 \cdot 10^{-6} \text{ amp.}$$

L'abscisse d'intersection des courbes :

$$\bar{i}_3 = \varphi_3(\varepsilon) \text{ et } \bar{i}_1 = \varphi_1(\varepsilon)$$

représente la valeur cherchée $\varepsilon = -0,0042$ volt (fig. 10 c).

DEUXIÈME EXEMPLE :

$$C = 50 \mu\text{F}, C'_g + C''_g = 10 \mu\text{F}, r = 4 \cdot 10^6 \text{ ohm}, \\ u_0 = 4 \text{ volts}, A = 1,0 \text{ volt}, \omega = 10^5 \text{ sec}^{-1}.$$

On trouve de (17) :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= rC\omega = 20, \varphi = 87^\circ 8' \\ B &= 20 \end{aligned}$$

L'équation (18) devient :

$$20 \cdot \sin(\omega t + \varphi) = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{du}{dt} + u + \left\{ \begin{array}{l} \\ + 4 \cdot 10^6 \cdot f(u) - 4 \end{array} \right\} \quad (27)$$

Les courbes représentant u et i_3 en fonction de t pour le premier cycle et $\bar{i}_1$ et $\bar{i}_3$ en fonction de ε sont données sur la figure 11. La courbe $u = F(t)$ n'est plus du tout une sinusoïde. On voit nettement la présence du second harmonique. Pour le premier cycle, on a $\varepsilon_1 = -0,34$ volt et pour le régime permanent $\varepsilon = -0,33$ volt.

CHAPITRE III

RÉSONANCE DE LA TENSION
DU CIRCUIT OSCILLANT
INSÉRÉ DANS LE CIRCUIT DE GRILLE
D'UNE LAMPE A TROIS ÉLECTRODES

7^o Position du problème. — Un circuit oscillant formé de la self-induction L et de la capacité étalonnée

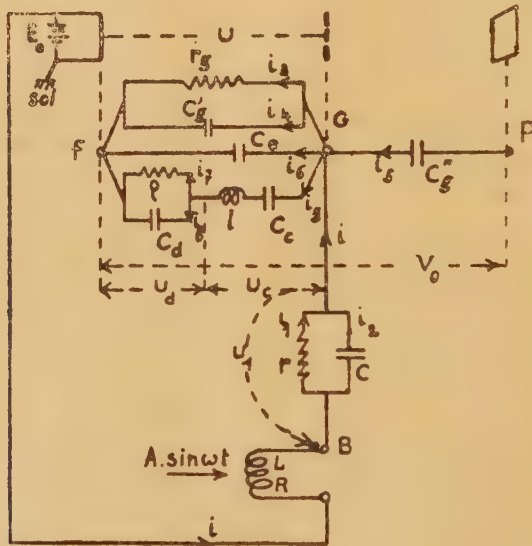


FIG. 12.

C_e et de la capacité de fuite C_d sera inséré dans le circuit de grille d'après la figure 12.

Soit L la self-induction provenant des fils de jonction et C_c une grande capacité servant à compenser l'effet

de la self-induction l. Les symboles C'_g , G''_g , r_g , r , C , v_0 indiquent les mêmes grandeurs que dans le chapitre précédent. L'équation : $i_3 = f(u)$ nous présente la caractéristique de grille à tension de plaque constante v_0 .

La figure 12 nous donne :

$$\begin{aligned} E_0 + A.\sin\omega t &= Ri + L \frac{di}{dt} + ri_1 + u \quad (I) \\ i &= i_1 + i_2, & i + i_5 &= i_3 + i_4 + i_6 + i_9 \\ i_9 &= i_7 + i_8, & u_1 &= ri_1 \\ i_2.dt &= C.du_1, & u_d &= \rho.i_7 \\ i_8.dt &= C_d.du_d, & i_6.dt &= C_e.du \\ i_4.dt &= C'_g.du, & i_5.dt &= C''_g.d(v_0 - u) \\ & & i_3 &= f(u) \end{aligned}$$

Après l'élimination de i_2 , i_3 , i_4 , i_5 , i_6 , i_7 , i_8 , i_9 et u_1 on a :

$$\begin{aligned} i &= i_1 + rC. \frac{di_1}{dt} \\ i &= f(u) + \frac{u_d}{\rho} + C_d. \frac{du_d}{dt} + (C_e + C'_g + C''_g). \frac{du}{dt} \quad (II) \end{aligned}$$

Si l'on remplace dans (I) i par l'expression (II), on a :

$$\begin{aligned} E_0 + A.\sin\omega t &= \\ L(C_e + C'_g + C''_g). \frac{d^2u}{dt^2} + LC_d \frac{d^2u_d}{dt^2} + \\ [L.f'(u) + R(C_e + C'_g + C''_g)]. \frac{du}{dt} + \left(\frac{L}{\rho} + RC_d \right) \frac{du_d}{dt} + \\ R.f(u) + \frac{R}{\rho}.u_d + u + ri_1 \end{aligned} \quad (28)$$

L'expression $u + ri_1$ représente la tension du point B (fig. 12). Posons :

$$u + ri_1 = B_0 + B.\sin(\omega t + \beta)$$

Les constantes B et β sont données par des équations (25), où il faut remplacer A par B, ψ par $\psi - \beta$ et M et N par :

$$M' = r.f'(u_0) + 1 + \frac{r}{\rho},$$

$$N' = r\omega(C + C_e + C_d + C'_g + C''_g)$$

(Le calcul est analogue à celui que nous avons fait au chapitre précédent). Dans les applications, nous prendrons :

$$r = 5.10^6 \text{ ohms}, C = 4.10^{-6} \text{ F}, \omega \gg 2.\pi 10^6 \text{ sec}^{-1},$$

ce qui donne :

$$\cot \varphi = \frac{1}{rC\omega} \leq 10^{-8}$$

et très approximativement :

$$\operatorname{tg}(\psi - \beta) = \frac{M'}{N'} - \cot \varphi,$$

$$\operatorname{tg}(\psi - \beta) = \frac{1}{C\omega} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} \right) = \frac{1}{\rho C\omega}$$

Pour $\rho \gg 1.000 \text{ ohms}$, on peut prendre :

$$\psi - \beta = 0 \text{ et } m^2 = 1$$

La constante B_0 est donnée par :

$$B_0 = u_0 + \varepsilon + r.f(u_0 + \varepsilon) = u_0 + \varepsilon + r. \frac{E_0 - B_0}{R}$$

On aura donc :

$$u + ri_1 = \frac{(u_0 + \varepsilon).R + rE_0}{R + r} + U.\sin(\omega t + \psi)$$

8° **Résolution de l'équation (28).** — Nous utiliserons encore le procédé indiqué au n° 6. Désignant par U_c et I_g les amplitudes de u_c et i_g , on a :

$$\left(l\omega - \frac{1}{C_c\omega} \right) I_g = U_c$$

Nous prendrons C_c telle qu'on ait :

$$lC_c \omega^2 = 1 \quad (29)$$

ce qui donne $U_c = 0$ et $u_d = U \sin(\omega t + \psi)$.

Les équations (24) seront remplacées par celles :

$$\left. \begin{aligned} P.U \cos \psi - Q.U \sin \psi &= A \\ P.U \sin \psi + Q.U \cos \psi &= 0 \\ \left[f'(u_0) + \frac{1}{R+r} \right] \cdot \varepsilon + \frac{1}{4} \cdot f''(u_0) \cdot U^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

P et Q désignant :

$$\left. \begin{aligned} P &= -LC_s \omega^2 + \frac{R}{\rho} + 1 + Rf'(u_0) \\ Q &= [Lf'(u_0) + \frac{L}{\rho} + RC_s] \cdot \omega \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

avec $C_s = C_e + C_d + C_g' + C_g''$

On tire aisément de (30) :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= - \frac{1}{4} \frac{f''(u_0)}{\frac{1}{R+r} + f'(u_0)} \cdot U^2 \\ U^2 &= \frac{A^2}{P^2 + Q^2} \\ P^2 + Q^2 &= \left[C_s^2 \omega^2 + \left(\frac{1}{\rho} + f'(u_0) \right)^2 \right] \cdot (R^2 + L^2 \omega^2) + \\ &\quad + 1 + 2R \left(\frac{1}{\rho} + f'(u_0) \right) - 2LC_s \omega^2 \end{aligned}$$

Si l'on fait varier C_s en variant C_e , la baisse de la tension de grille ε sera maximum pour :

$$\frac{d}{dC_s} (P^2 + Q^2) = (R^2 + L^2 \omega^2) \cdot 2C_s \omega^2 - 2L \omega^2 = 0$$

d'où, désignant par C_{em} la capacité du condensateur

étaloné C_e qui correspond à la résonance de tension,

$$C_{em} + C_d + C_g' + C_g'' = \frac{L}{R^2 + L^2\omega^2} \quad (33)$$

La valeur maximum de U est :

$$U_m = \frac{A}{\left(\frac{1}{\rho} + f'(u_0)\right) \cdot \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} + \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}} \quad (34)$$

9^o Application à la mesure de la constante diélectrique. — Nous verrons plus loin que la mesure de la constante diélectrique d'un liquide se ramène à la mesure de la différence de deux capacités C_{1d} et C_{2d} que l'on peut donner au condensateur C_d contenant le liquide. Soient C_{1em} et C_{2em} les capacités du condensateur étaloné C_e correspondant à la résonance de tension quand on donne au condensateur contenant le liquide les valeurs C_{1d} et C_{2d} .

En vertu de la formule (33), on a :

$$C_{1em} + C_{1d} = C_{2em} + C_{2d}$$

d'où :

$$C_{1d} - C_{2d} = C_{2em} - C_{1em} \quad (35)$$

Le condensateur contenant le liquide en général est équivalent, au point de vue électrique, à une capacité C_d shuntée par une résistance ohmique ρ . Quand on fait varier C_d , ρ varie aussi. Mais celle-ci n'intervient pas dans la formule (33). C'est justement le fait que la capacité du condensateur, shuntée par une résistance, correspondant à la résonance de tension à ses bornes, est indépendante de cette résistance, que l'on utilise dans cette méthode de mesure de la constante diélectrique des liquides.

CHAPITRE IV

MONTAGES ET APPAREILS

10° **L'émetteur.** — Nous avons utilisé l'émetteur qui a servi au travail de Beauvilain [3]. Le circuit oscillant se trouve dans le circuit de grille (fig. 13).

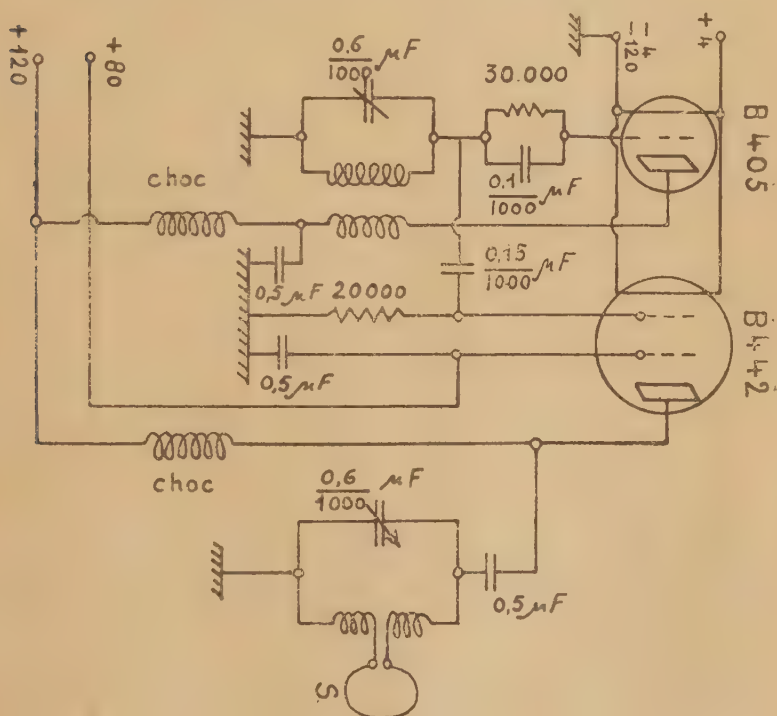


FIG. 13.

La capacité shuntée dans le circuit de grille sert à la stabilisation des oscillations. L'oscillateur est suivi d'un

étage amplificateur à résonance à une lampe écran (Philips B 442). Au milieu de la bobine du circuit oscillant anodique se trouve insérée une spire à grande surface constituée par un ruban circulaire en laiton; elle

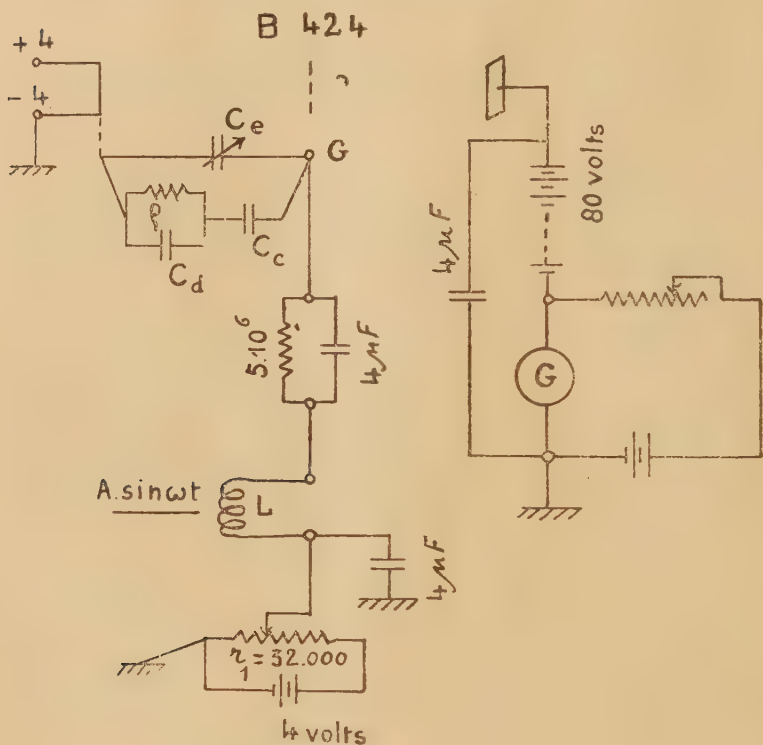


FIG. 14.

sert à exciter le circuit oscillant de mesure. L'oscillateur est soigneusement blindé. L'alimentation se fait par accumulateurs.

12° Le récepteur. — Nous avons utilisé la lampe Philips B 442. Le montage est montré sur la figure 14. La carcasse de la bobine du circuit oscillant de mesure est formée par quatre règles en ébonite de bonne qualité non polie. Elles sont fixées aux extrémités par deux

couronnes circulaires. L'enroulement est fait par un fil de cuivre nu de 0 mm. 5. Le pas d'enroulement est 4 millimètres. Les encoches profondes de 3 à 5 millimètres maintiennent les spires en place. La bobine a 45 centimètres de longueur, sa section est un carré de 10×10 centimètres. L'inductance totale est 0,318 mh. La bobine se trouve à 50 centimètres au-dessus du montage. La prise du nombre des spires voulu se fait par une pince à contact.

Pour le condensateur C_c nous disposons de deux condensateurs variables que nous appellerons les condensateurs n° 1 et n° 2.

Le condensateur n° 1 est formé de trois capacités groupées dans un carter métallique : deux fixes de 2,3354 et 2,3444 millièmes de microfarad et une variable de 0,1254 à 3,1247 millièmes de microfarad comprenant deux cents divisions en degrés; une division correspond en moyenne à 15,6 micro-microfarads. La commande de cette dernière s'effectue au moyen d'une tige en ébonite longue de 30 centimètres. Le condensateur variable est muni d'un cadran à vernier donnant le dixième de degré. Le mouvement est démultiplié. Le carter et le rotor du condensateur variable sont mis au sol. La stéatite sert pour l'isolation. L'appareil a été construit par la « Précision Électrique » et étalonné au laboratoire national de Radio Électricité (pont de Carey-Foster, 1.000 périodes, température 18°).

Le condensateur n° 2 est formé de trois capacités groupées dans un carter métallique : deux fixes de 0,3285 et 0,6432 millièmes de microfarad et d'une capacité variable de 0,1249 à 0,4815 millièmes de microfarad comprenant deux cents divisions en degrés; une division correspond, en moyenne, à 1,87 micro-microfarad. Le condensateur variable est muni d'un cadran à vernier donnant le dixième de degré. Le mouvement est démultiplié. Le carter et le rotor du condensateur variable sont mis au sol. Il est également construit par la « Pré-

cision Électrique » et étalonné au laboratoire national de Radio-Électricité (pont de Carey-Foster, 800 périodes, température 18°).

Les variations du courant anodique, après avoir été compensées, sont mesurées par le galvanomètre G. Nous

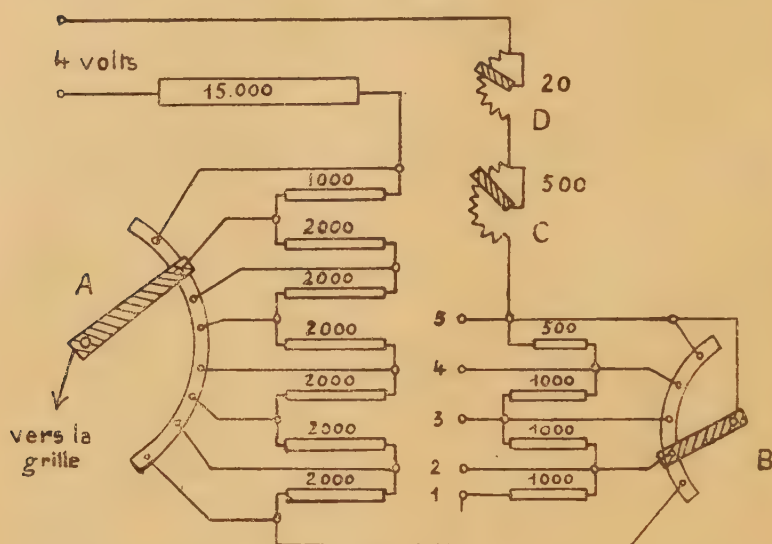


FIG. 15.

avons utilisé deux galvanomètres selon la grandeur de la résistance de fuite ρ ; le premier est un galvanomètre Carpentier du type courant : résistance du cadre 26 ohms, sensibilité de 5 mm. 5 par microampère à la distance de 1 m. 50. Le second est un galvanomètre Hartmann et Braun avec le cadre mobile à deux enroulements. La résistance de l'enroulement à fil plus fin est 510 ohms et la sensibilité est 3.10^9 ampères à la distance de 1 m. 50.

La résistance r_1 de 32.000 ohms est réalisée d'après le schéma sur la figure 15. En court-circuitant deux des cinq bornes numérotées par 1, 2, 3, 4 et 5 on peut supprimer à volonté des résistances de 500 ohms et trois de

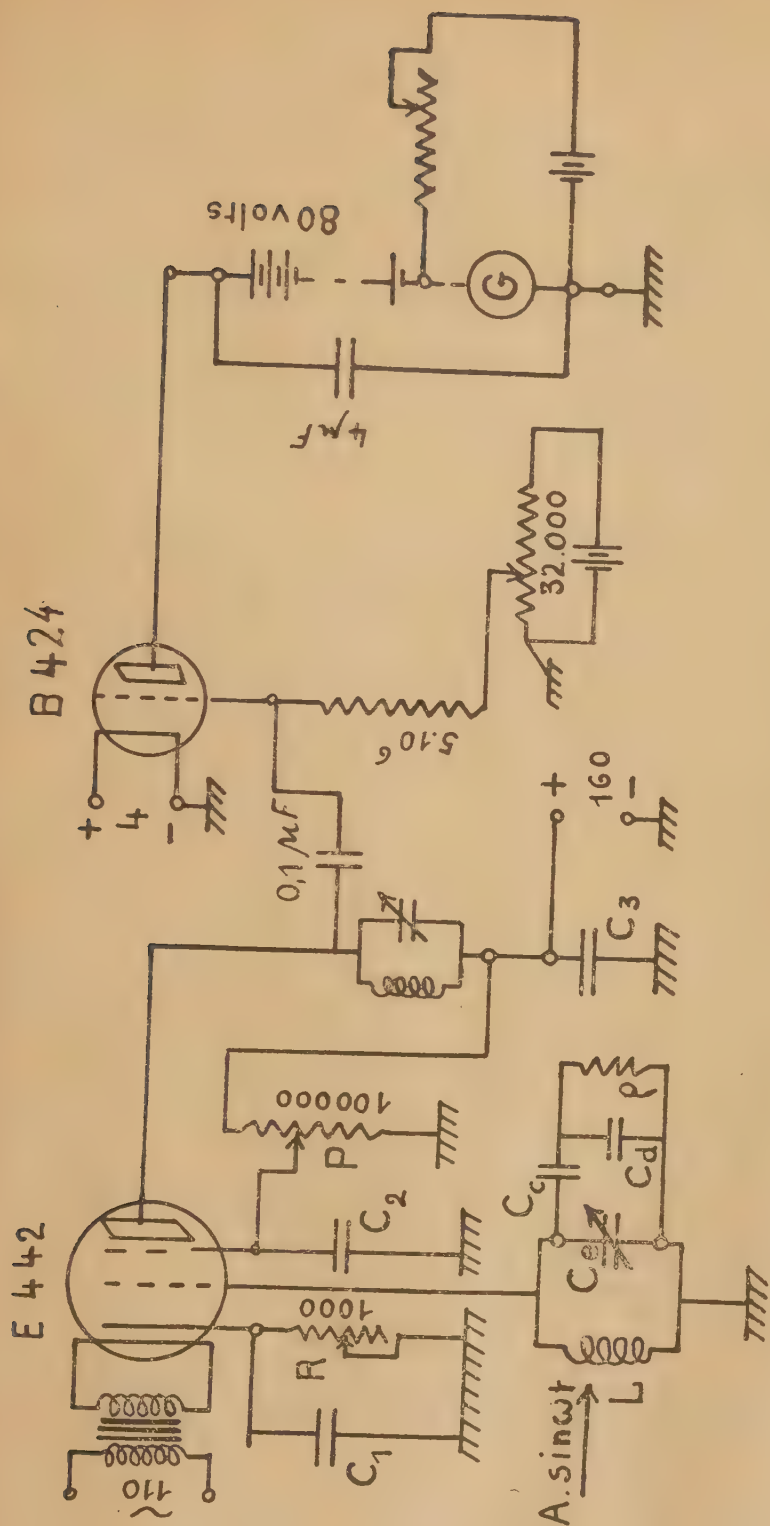


FIG. 16.

1.000 ohms. A et B sont des commutateurs à plots, C et D des potentiomètres ordinaires.

12° **L'amplificateur.** — Pour des mesures de la constante diélectrique des électrolytes, nous nous sommes servi utilement du montage indiqué sur la figure 16, en séparant le récepteur et le circuit oscillant de mesure par un amplificateur à résonance à une lampe écran (Philips E 442). Cet amplificateur a servi au travail de Beauvilain.

13° **Le condensateur contenant le liquide.** — Il est représenté sur la figure 17. Un vase cylindrique en cristal à double paroi constitue le récipient A. Les deux parties du récipient sont réunies par un rodage. Les armatures du condensateur sont en platine iridié à 25 % et forment un condensateur cylindrique. Elles sont supportées par le bouchon rodé B. L'armature interne F est une tige de 2 millimètres de diamètre; elle est soutenue par la tige I qui coulisse à frottement gras dans sa monture réalisée à l'intérieur de l'ensemble G. Avec deux butées réglables J, on peut varier la longueur de tige F qui pénètre à l'intérieur de l'armature externe C; la longueur maximum étant 48 millimètres, elle est déterminée de façon à ce que l'influence des bouts du condensateur soit négligeable, c'est-à-dire que la variation de capacité, quand on déplace l'armature interne, puisse être représentée comme la capacité d'un condensateur cylindrique idéal de longueur égale au déplacement de l'armature interne. La partie mobile de l'ensemble G est immobilisée par la vis de blocage L; ergot K couliissante dans une fente empêche la rotation. La position de l'armature interne est repérée par la longueur d de façon à ce que l'on ait :

$$l = 48 - d \text{ mm} \quad (36)$$

l désignant la longueur en millimètres de l'armature interne qui fait partie du condensateur. L'armature

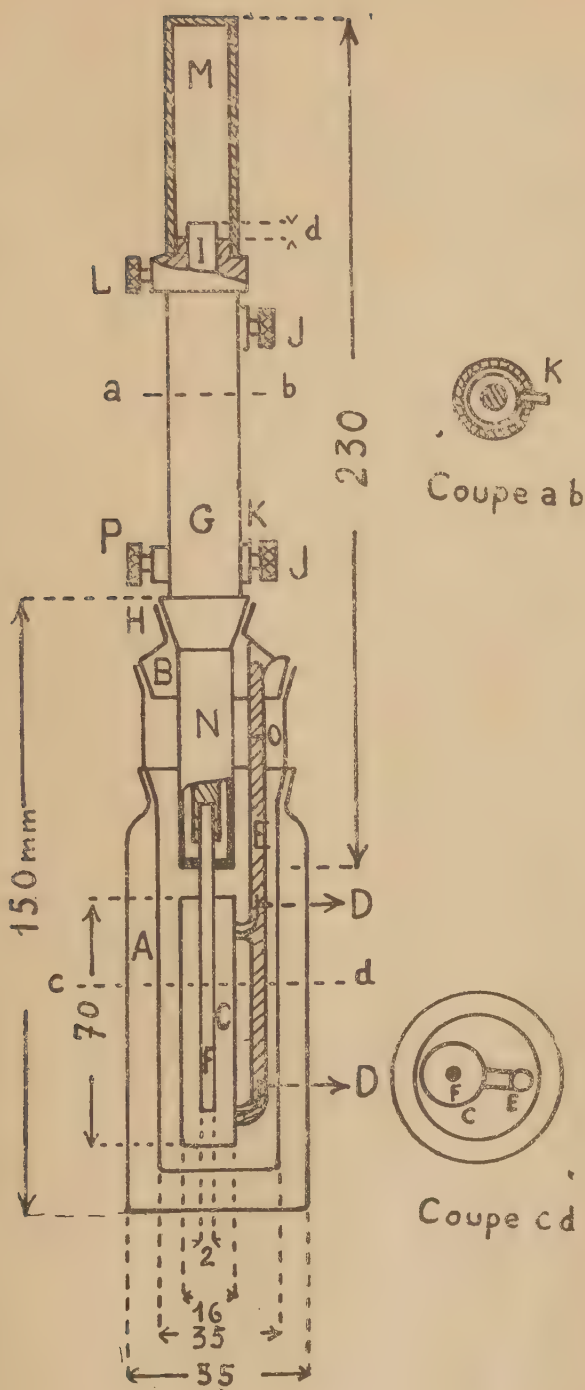


Fig. 17.

A. Récipient de verre à double paroi. — B. Bouchon rôdé. — C. Electrode interne en platine. — D. Amorces conductrices en platine. — E. Tubesupport en verre. — F. Electrode interne en platine. — G. Support-guide en laiton. — H. Rôdage. — I. Tige-support-coulissante en laiton. — J. Butées réglables. — K. Ergot solitaire de la tige coulissante. — L. Vis de blocage de la tige coulissante. — M. Ecran supérieur. — N. Ecran intérieur. — O. Soudure du bouchon et de la tige de verre. — P. Vis de connection avec l'électrode centrale.

externe C est un tube cylindrique de 16 millimètres de diamètre et de 0 mm. 1 d'épaisseur. Elle est supportée par un tube de verre E de 4 millimètres de diamètre relié au bouchon B par la soudure O. Deux petits fils D soudés au tube E et le mercure qui emplit le tube font la connection de l'armature externe. La constance de la capacité résiduelle, quand l'armature interne se déplace, est assurée par des écrans M et N. Pour éviter l'altération, les pièces métalliques sont légèrement graissées. L'armature interne est mise au sol. L'espace compris entre les deux parois du récipient A est rempli d'huile de vaseline, pour remédier à la capacité de fuite due à la présence de l'eau du thermostat [8]. Le centrage des armatures est délicat. On effectue la soudure O quand les armatures du condensateur sont en place, maintenues par l'intermédiaire d'un mandrin.

Le déplacement de l'armature interne du condensateur fait varier le niveau du liquide. La variation maximum correspondant à la course maximum est 0 mm. 2 environ; l'erreur qui en résulte est négligeable devant la précision de mesure. Pour immerger complètement les armatures, il suffit de 60 centimètres cubes de liquide.

14° Le thermostat. — Il est constitué par une cuve cylindrique de 40 centimètres de diamètre et 45 centimètres de profondeur, calorifugée par une épaisseur de papier froissé de 7 à 8 centimètres. Le fonctionnement s'effectue entièrement sur le secteur continu (fig. 18). Le chauffage rapide se fait par une chaufferette de 700 wats, constituée par un fil résistant enroulé en boudin et préservé du contact de l'eau par un tube en U en silice fondue. Elle a une inertie négligeable, ce qui permet d'amener la température à quelques dixièmes de degré au-dessous de la valeur désirée. L'établissement et la régularisation de la température s'effectuent au moyen de trois lampes A, B, C, respectivement de 25, 60 et 100 wats.

Le régulateur G est un réservoir à grande surface de

contact avec l'eau. Le toluène, qui remplit le réservoir, en se dilatant pousse le mercure. Celui-ci au contact d'une pointe, ferme le circuit de la bobine F d'un relai commandant le chauffage. L'augmentation de la tem-

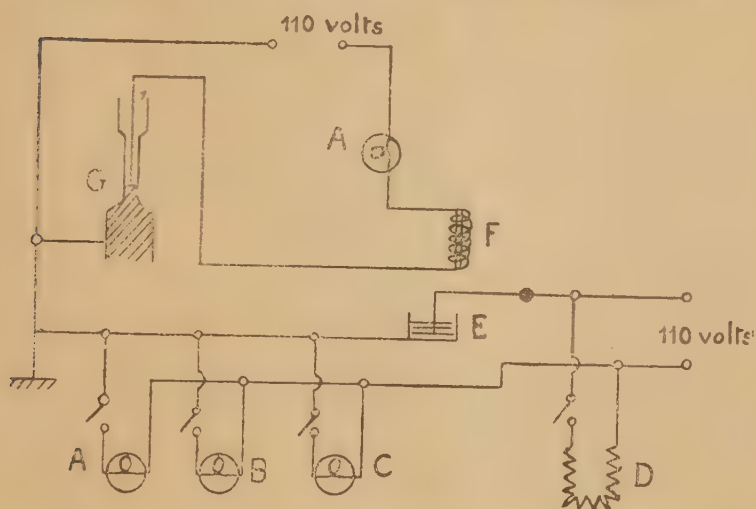


FIG. 18.

pérature de 1 degré fait varier la longueur de la colonne de 20 centimètres environ.

Le jeu des lampes A, B, C a un double rôle. Quand on opère à température constante, il permet, grâce à l'interrupteur à mercure E d'atteindre puis de maintenir automatiquement constante la température désirée. Si, au contraire, on fait des mesures en fonction de la température, un simple calcul nous permet de savoir lesquelles des lampes A, B et C il faut allumer pour compenser sensiblement les pertes de chaleur par rayonnement et conduction et par suite garder une température constante pendant la durée des mesures, qui est relativement courte.

L'agitation se fait par l'air comprimé. Sa détente produit le refroidissement de l'eau du thermostat, d'où proviennent de faibles oscillations de la température dont

l'amplitude est de l'ordre de 0°02. Le thermomètre utilisé indique la température au cinquantième de degré. Pour éviter que les nombreuses impuretés que l'air comprimé entraîne toujours avec lui, viennent salir continuellement l'eau du thermostat, nous avons fait

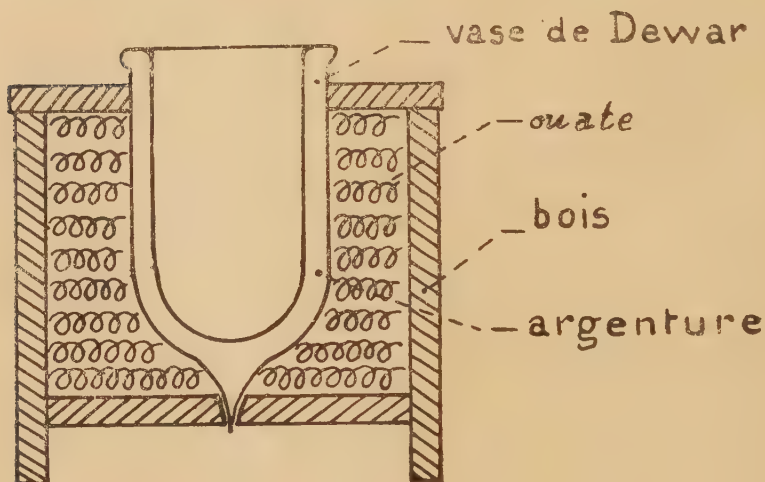


FIG. 19.

barboter cet air dans deux flacons laveurs, le premier contenant un mélange d'acide sulfurique et de permanganate, le second une solution concentrée de soude.

Pour les températures basses, nous nous sommes servis de l'appareil montré sur la figure 19. Le vase de Dewar à double paroi, avec argenture externe pour la paroi interne et argenture interne pour la paroi externe est calorifugé par de l'ouate qui remplit l'espace compris entre le vase et la boîte en bois. Le liquide réfrigérant est l'alcool dénaturé, dans lequel on jette, morceau par morceau, la neige carbonique.

La mesure de la température se fait au moyen d'un thermomètre à alcool donnant la température en degrés de moins 105 à plus 30°.

15° Mesures des fréquences et des capacités. —

Nous avons utilisé la méthode des doubles battements [9]. On se sert pour cela de deux émetteurs et d'un récepteur à réaction. L'un des émetteurs est celui qui excite le circuit oscillant de mesure. L'émetteur auxiliaire est du même type que l'émetteur principal. Il est muni de lampes Philips E 415 et E 442 et fonctionne sur secteur. Le récepteur est à résonance et à réaction; l'alimentation est faite par le secteur. On accorde deux émetteurs hétérodynes en écoutant les battements dans le récepteur à réaction. On entend un sifflement modulé à la différence des fréquences des émetteurs. Quand on s'approche de l'accord, le battement devient de plus en plus lent. Un circuit oscillant étalonné en fréquence et capacité (ondemètre) est couplé à l'émetteur auxiliaire par l'intermédiaire d'un circuit apériodique. Au voisinage de l'accord de ce circuit sur l'onde commune de deux émetteurs, les battements s'accélèrent, puis se ralentissent, pour disparaître à l'accord exact; ensuite ils réapparaissent.

L'ondemètre, du type dit « à absorption », a été construit par la « Précision Électrique » et étalonné au laboratoire national de Radio Électricité. Il se compose de deux capacités fixes de 0,3285 et 0,6432 millièmes de microfarad et d'une capacité variable de 0,1249 à 0,4815 millièmes de microfarad. Cette dernière est munie d'un cadran à vernier donnant le dixième de degré. Le mouvement est démultiplié. Avec six bobines interchangeables, l'ondemètre peut couvrir la gamme de 100 à 25.000 kilopériodes.

Une capacité se mesure par la méthode d'addition en parallèle sur le condensateur de l'ondemètre.

Pour que la précision de mesure soit suffisante, il faut prendre les précautions suivantes :

- a) les couplages doivent être faibles,
- b) les émetteurs ne doivent pas se synchroniser, ce qu'on réalise en employant des émetteurs munis d'étages amplificateurs à lampe écran qui évitent les réactions,

c) la résistance du circuit étalonné doit être faible par rapport à celle de la lampe oscillatrice de l'émetteur auquel il est couplé [10].

La précision est pratiquement celle des étalonnages : fréquence à un millième près (méthode des doubles battements); capacités à 0,0001 millième de microfarad près (pont de Carey-Foster).

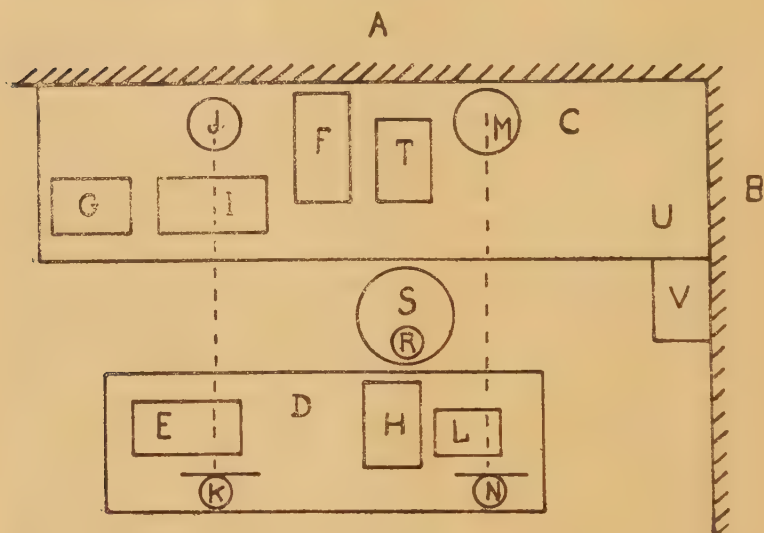


FIG. 20.

A, B. Murs. — C, D. Tables. — E. Émetteur principal. — F. Émetteur auxiliaire. — G. Récepteur à réaction. — H. Récepteur du circuit oscillant de mesure et amplificateur (au-dessous). — I. Ondemètre. — J, K. Galvanomètre Carpentier et son échelle. — L. Condensateur étalonné du circuit oscillant de mesure. — M, N. Galvanomètre Hartmann et Braun et son échelle. — R. Condensateur qui contient le liquide. — S, T. Thermostat et son régulateur. — U, V. Appareils à distiller et évier. Les accumulateurs sont sous la table C.

16° Disposition générale des appareils. — La figure 20 représente schématiquement la disposition des appareils. Nous avons tâché autant que possible que l'émetteur E qui sert à exciter le circuit oscillant de mesure soit loin de toutes les pièces métalliques. L'appareil pour obtention de l'eau bi-distillée se trouvait dans une autre pièce du laboratoire.

CHAPITRE V

ÉTUDE SUCCINCTE DE QUELQUES MONTAGES BASÉS SUR LA MÉTHODE DE LA RÉSONANCE DE TENSION

17° **Emploi du thermo-couple.** — Il existe un grand nombre de montages appliqués à la mesure de la constante diélectrique par la méthode de la résonance de tension. Nous en mentionnerons quelques-uns et ne prétendons pas être complets.

La figure 21 représente le schéma du circuit oscillant de mesure utilisé par R. T. Lattey, O. Gatty et W. G. Davies [11, 12, 13]. Lattey se servait au commencement de la méthode de résonance du courant, mais ensuite il l'a abandonnée en montrant dans ses travaux postérieurs les avantages de la méthode de résonance de tension sur la méthode de résonance du courant. La valeur maximum de tension est constatée par le thermo-couple T_h muni du galvanomètre G . Lattey a montré que la valeur maximum de tension entre les armatures du condensateur C_d contenant le liquide sera donnée par la déviation maximum du galvanomètre,

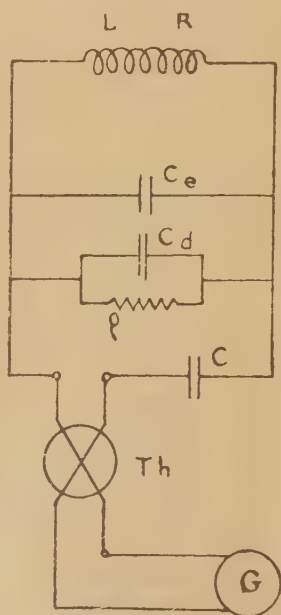


FIG. 21.

c'est-à-dire que la résonance de tension aux bornes de C_d a lieu en même temps que la résonance du courant passant à travers le galvanomètre. Les résistances des secteurs sont : 2,93 ohms et 5,26 ohms; la seconde résistance correspond au secteur connecté au galvanomètre. La résistance du galvanomètre est 10 ohms. Nous donnerons quelques résultats de mesure effectuées par R. T. Lattey et W. G. Davies [13]. p désigne la concentration en équivalents-grammes dans 1.000 grammes de solution. Le solvant est l'eau distillée. Les mesures étaient faites avec les oscillations dont la longueur d'onde était entre 36 mètres et 77 m. 5. Les valeurs données pour la constante diélectrique D représentent les valeurs moyennes des constantes diélectriques obtenues pour différentes longueurs d'onde.

Solutions de KCl

p Concentration en équivalent gramme par 1.000 grammes de solution	D à 18°C	D à 25°C
—	—	—
0	80,79	78,24
0,000963	81,09	79,11
0,002133	82,28	79,79
0,002830	82,54	80,10
0,003983	83,76	80,82
0,004783	83,71	81,76
0,006658	85,50	82,98
0,007452	85,58	83,64
0,008658	86,28	84,83
0,009303	87,04	85,03
0,010225	88,00	
0,012092	90,22	

Solutions de Na Cl

P Concentration en équivalent gramme par 1.000 grammes de solution	D	
	à 18°C	à 25°C
0	80,79	78,24
0,001205	80,97	78,93
0,002124	82,18	79,42
0,004225	83,54	
0,004340	83,21	81,35
0,005561	84,22	82,62
0,007550	85,39	83,38
0,009965	87,06	86,20
0,011013	87,66	86,79

Les données numériques ci-dessus montrent que la constante diélectrique des solutions augmente avec la concentration, l'augmentation étant à peu près linéairement proportionnelle à la concentration. Nous verrons plus loin des mesures qui montrent qu'au contraire la constante diélectrique diminue avec la concentration.

L'emploi du thermo-couple comme indicateur de résonance présente l'inconvénient d'amortir le circuit oscillant. Pour supprimer cet inconvénient, Beauvilain [3] a fait des mesures utilisant un montage où il fait l'amplification des oscillations électriques avant d'utiliser le thermo-couple comme indicateur de la résonance de tension. La fréquence utilisée était de l'ordre $1,6.10^6 \text{ sec}^{-1}$. Dans ces mesures, il a trouvé que la constante diélectrique des solutions électrolytiques subit une décroissance linéaire, quand la concentration augmente. Il donne la formule :

$$\frac{D}{D_0} = 1 - kc$$

où c est la concentration exprimée en molécules-grammes par litre de solution, D la constante diélectrique de la solution, D_0 celle du solvant (eau) et k une constante qui dépend du corps dissous :

Sels	LiCl	NaCl	KCl	RbCl	C ₂ Cl
k	24	24	31	49	34
Sels	NO ³ Na	NO ³ K	NO ³ Cs	NO ³ Rb	
k	48	53	79	70	

18° Autres indicateurs de résonance. — Comme indicateur de la résonance de tension H. Kniepkamp [14] a utilisé un électromètre. Il a mesuré la constante diélectrique du sucre de canne dissous dans l'eau. La longueur d'onde des oscillations électriques était 530 mètres. En désignant par ϵ la constante diélectrique de la solution sucrée, ϵ_0 celle du solvant (eau) et par p la concentration en grammes par 100 centimètres cubes de solution, il donne les nombres suivants :

$$p = \begin{matrix} 10 & 15 & 20 \end{matrix}$$

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \begin{matrix} 0,968 & 0,952 & 0,938 \end{matrix}$$

Dans les mesures de la constante diélectrique A. Astin [15] a utilisé un voltmètre à lampe (fig. 22) comme indicateur de la résonance de tension.

L'indicateur de la résonance de tension est donc en principe le même que celui que nous avons adopté dans notre montage. Mais au point de vue d'étude théorique, le montage de A. Astin est plus compliqué que le nôtre. Il ne donne aucune étude théorique de son montage en ce qui concerne les perturbations provoquées par les lampes sur le circuit oscillant de mesure. Il étudie théoriquement tout simplement un circuit oscillant

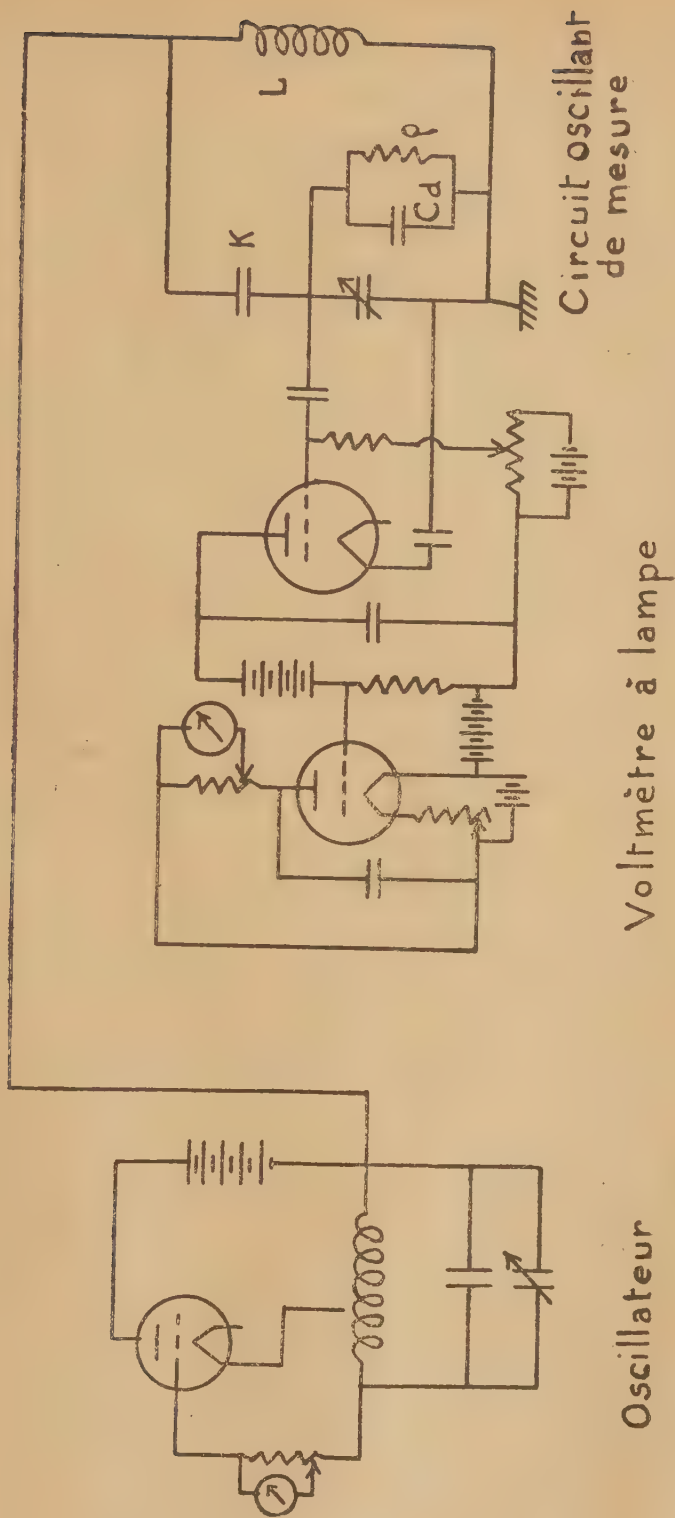


Fig. 22.

isolé, quand sa bobine L est le siège d'une force électromotrice induite de la forme sinusoïdale. Cette hypothèse, comme il a remarqué lui-même, n'est pas suffisamment légitime pour le couplage adopté du circuit oscillant de mesure avec l'émetteur, le couplage étant effectué par une longue antenne horizontale.

Dans les mesures de la constante diélectrique de A. Astin, la fréquence était $2,7 \cdot 10^6 \text{sec}^{-1}$. Il a mesuré la constante diélectrique de KCl et du sucre dissous dans l'eau. Désignant par K_k la constante diélectrique de la solution de KCl; K_s celle de la solution du sucre, K celle de l'eau et par p la concentration en molécule-gramme par litre, les mesures de A. Astin donnent les nombres suivants :

Solutions de KCl

p =	0,00025	0,0005	0,001	0,002	0,003
$\frac{K_k}{K}$ =	0,988	0,978	0,989	1,001	1,019

Solutions de sucre

p =	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00
$\frac{K_s}{K}$ =	0,978	0,967	0,943	0,915	0,887

Les mesures étaient faites à la température de 25°C.

CHAPITRE VI

MODE OPÉRATOIRE ET QUELQUES RÉSULTATS DE MESURE

19° **Réalisation expérimentale de la condition :**
 $lC_c\omega^2 = 1$. — Nous avons vu au n° 3 qu'il faut compenser la self-induction l (fig. 4), provenant des fils de jonction du condensateur contenant le liquide, par une grande capacité C_c pour que l'on ait le droit de se servir de l'équation (14) d'après laquelle on peut écrire :

$$C_{1e} + C_{1d} = C_{2e} + C_{2d} = C_o \quad (37)$$

où C_{1e} et C_{1d} représentent les capacités du condensateur étalonné et du condensateur contenant le liquide, quand on a la résonance dans la position $A_1 - A_1$ de l'électrode interne (fig. 23); C_{2e} et C_{2d} correspondent à la position $A_2 - A_2$; C_o est une valeur constante. Les capacités C_{1d} et C_{2d} sont données par les expressions :

$$\begin{aligned} C_{2d} &= a, \\ C_{1d} &= a + b.s.\epsilon, \end{aligned}$$

a et b désignant des constantes, s la distance entre les sections $A_1 - A_1$ et $A_2 - A_2$ et ϵ la constante diélectrique du liquide qui remplit le condensateur. Les positions $A_1 - A_1$ et $A_2 - A_2$ de l'électrode interne sont déterminées de façon à ce que l'on ait le droit de prendre pour C_{1d} et C_{2d} les expressions ci-dessus. Alors on tire de (37) :

$$C_{1d} - C_{2d} = C_{2e} - C_{1e} = b\epsilon.s \quad (38)$$

Pour la position $A_2 - A_2$ invariable et pour de différentes positions de la section $A_1 - A_1$ l'équation (38) nous montre que la différence $C_{2e} - C_{1e}$ varie *linéairement* en fonction de s .

Si la condition :

$$l.C_c.\omega^2 = 1$$

n'est pas satisfaite, l'équation (37) sera remplacée par :

$$C'_{1e} + y_1 = C'_{2e} + y_2 = C_0 \quad (39)$$

où y représente la valeur donnée par l'équation (11), les indices 1 et 2 correspondant aux positions $A_1 - A_1$

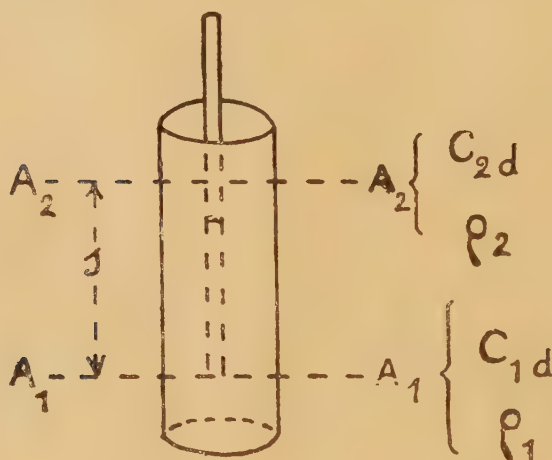


FIG. 23.

et $A_2 - A_2$ de l'électrode interne du condensateur contenant le liquide. Nous mettrons l'expression pour y sous la forme :

$$y = \alpha.C_d - \beta \quad (40)$$

avec :

$$\alpha = \frac{1}{x + \left(\frac{l\omega}{\rho}\right)^2 \frac{1}{x}}$$

$$\beta = \frac{1}{\rho^2 X^2 + l^2 \omega^2}$$

où $x = 1 - C_d l \omega^2$

représente un nombre qui diffère peu de l'unité.

Il est facile de démontrer que l'on a :

$$\alpha_1 < \alpha_2 \text{ et } \beta_1 > \beta_2 \quad (41)$$

α_1 et β_1 désignant les valeurs qui correspondent à la

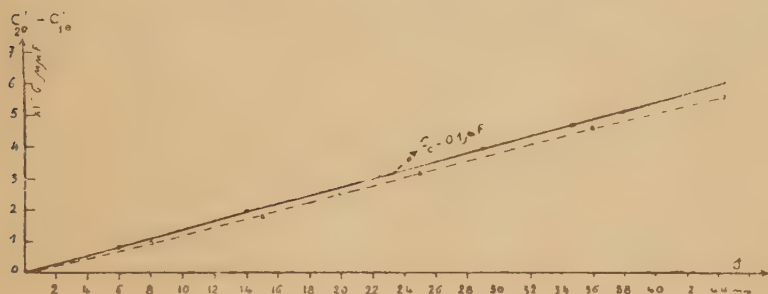


FIG. 24

position $A_1 - A_1$, α_2 et β_2 celles qui correspondent à la position $A_2 - A_2$ de l'électrode interne.

En partant de l'équation (39), on trouve :

$$C'_{2e} - C'_{1e} = y_1 - y_2 = \alpha_1 C_{1d} - \alpha_2 C_{2d} - (\beta_1 - \beta_2)$$

En tenant compte de (41), on a finalement :

$$C'_{2e} - C'_{e1} < C_{1d} - C_{2d},$$

et d'après (38) :

$$C'_{2e} - C'_{1e} < b \epsilon \epsilon s \quad (42)$$

C'est en traçant expérimentalement la courbe :

$$C'_{2e} - C'_{1e} = F(s) \quad (43)$$

en prenant s comme abscisse et $C'_{2e} - C'_{1e}$ comme ordonné que l'on voit si la self-induction l est compensée ou non.

Tant que l'équation (43) ne représente pas une droite, la self-induction l ne sera pas compensée. La figure 24 nous représente graphiquement l'équation 43 dans deux cas : *a*) la capacité de compensation C_c est supprimée et *b*) la capacité de compensation est 0,1 microfarad.

Dans les deux cas, le condensateur contenait la solution de chlorure de potassium (KCl) dans l'eau dont la concentration était 0,003 molécules-grammes par litre. La fréquence utilisée était 1613 kilocycles par seconde. La courbe donnée par (43) est d'autant plus éloignée d'une droite que la résistance ρ du liquide est plus petite.

Une fois trouvée la valeur convenable pour la capacité de compensation C_c , on la garde pour toujours à la condition que la longueur et la position des fils de jonction du condensateur C_d restent invariables, ainsi que la fréquence des oscillations électriques.

20° Détermination de la capacité de résonance. — Nous avons tracé un certain nombre de courbes de résonance en portant comme abscisses les variations de la capacité étalonnée et comme ordonnées les variations de la déviation du spot du galvanomètre. Ce sont ces courbes qui montrent le mieux deux faits les plus importants : la sensibilité du montage utilisé et la précision avec laquelle on peut déterminer la capacité, correspondant à la résonance, du condensateur étalonné. Toutes les courbes de résonance sont tracées pour la position $A_1 - A_1$ (fig. 23) de l'électrode interne.

La figure 25 représente deux courbes de résonance quand le condensateur C_d est rempli d'air. La fréquence de l'émetteur était 938,5 kilopériodes par seconde (soit une longueur d'onde de 320 mètres). Le montage utilisé est celui de la figure 14. La courbe (1) est obtenue avec le galvanomètre Carpentier où un millimètre de l'échelle galvanométrique correspond à $2 \cdot 10^{-7}$ ampères. Comme les courbes de résonance ont leur sommet assez aplati

et comme, d'autre part, elles sont symétriques par rapport à la droite $C = C_m$ (fig. 1), on fait deux lectures pour des valeurs symétriques par rapport à C_m et on

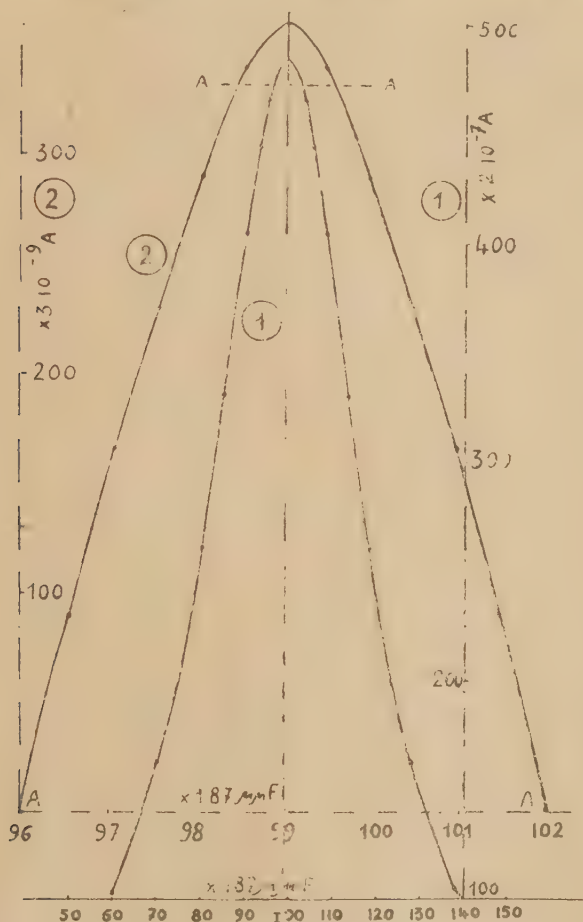


FIG. 25.

prend la moyenne. En désignant par ΔC la variation de la capacité étalonnée et par α la variation correspondante de la position du spot, la courbe (1) donne :

$$\Delta C = 5 \text{ divisions soit } 5,1,87 \mu F,$$

$$\alpha = 70 \text{ mm}$$

La déviation de 1 millimètre du spot correspond donc à :

$$\frac{\Delta C}{\alpha} = \frac{5}{70} = 0,07 \frac{\text{div.}}{\text{mm}} \text{ soit } 0,134 \frac{\mu\mu F}{\text{mm}}$$

[Pour obtenir la courbe (2) sur la figure 25, nous avons compensé, en modifiant le courant de compensation (fig. 14), la déviation du spot jusqu'à la droite A — A et ensuite utilisé le galvanomètre Hartmann et Braun où un millimètre de l'échelle galvanométrique correspond à 3.10^{-9} ampères. Ici nous avons :

$$\begin{aligned} \Delta C &= 1 \text{ division soit } 1,87 \mu\mu F \\ \alpha &= 160 \text{ mm} \end{aligned}$$

et la déviation de 1 millimètre du spot correspond donc à :

$$\frac{\Delta C}{\alpha} = \frac{1}{160} = 0,0062 \frac{\text{div.}}{\text{mm}} \text{ soit } 0,0117 \frac{\mu\mu F}{\text{mm}}$$

Il faut remarquer que nous n'avons pas profité de cette sensibilité du montage, étant donné que la graduation du condensateur étalonné ne nous permettait d'apprécier que 0,05 de division, la graduation du vernier donnant un dixième de division.

La figure 26 représente les courbes de résonance, quand le condensateur C_d est rempli avec la solution de KCl dans l'eau dont la concentration était 0,003 molécule-gramme par litre. Les courbes (1) et (3) correspondent à la fréquence 1613 kilopériodes par seconde (soit une longueur d'onde de 186 mètres) tandis que les courbes (2) et (4) correspondent à la fréquence 938,5 kilopériodes par seconde. Le montage utilisé est celui de la figure 16. Les courbes (1) et (4) sont obtenues avec le galvanomètre Carpentier et celles (2) et (3) avec le galvanomètre Hartman et Braun. Pour la courbe (4), on a :

$\Delta C_4 = 10$ divisions soit $10.15,6 \mu\mu F$,
 $\alpha_4 = 12$ mm,

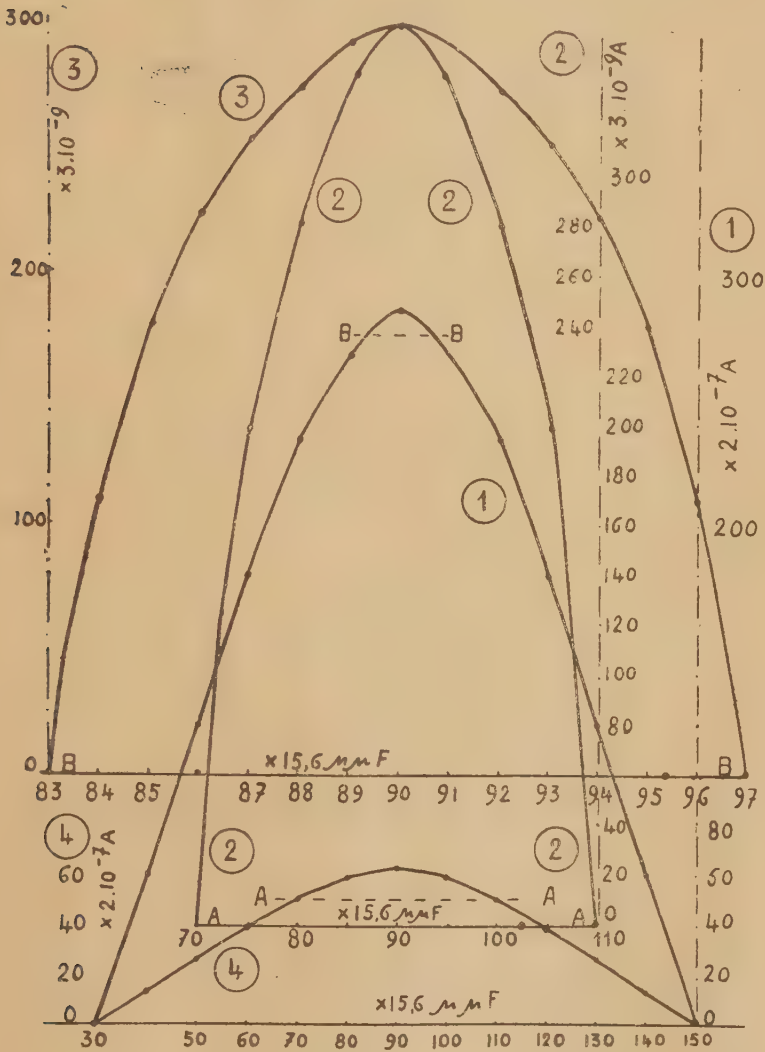


FIG. 26.

$$\frac{\Delta C_4}{\alpha_4} = \frac{10}{12} = 0,83 \frac{\text{div.}}{\text{mm}} \text{ soit } 13 \frac{\mu\mu F}{\text{mm}},$$

et pour les autres courbes :

$$\Delta C_1 = 10 \text{ divisions soit } 10.15,6 \mu\mu F,$$

$$\alpha_1 = 60 \text{ mm},$$

$$\frac{\Delta C_1}{\alpha_1} = \frac{10}{60} = 0,167 \frac{\text{div.}}{\text{mm}} \text{ soit } 2,6 \frac{\mu\mu F}{\text{mm}},$$

$$\Delta C_2 = 5 \text{ divisions soit } 5.15,6 \mu\mu F,$$

$$\alpha_2 = 200 \text{ mm},$$

$$\frac{\Delta C_2}{\alpha_2} = \frac{5}{200} = 0,025 \frac{\text{div.}}{\text{mm}} \text{ soit } 0,39 \frac{\mu\mu F}{\text{mm}},$$

$$\Delta C_3 = 1 \text{ division soit } 15,6 \mu\mu F,$$

$$\alpha_3 = 110 \text{ mm},$$

$$\frac{\Delta C_3}{\alpha_3} = \frac{1}{110} = 0,009 \frac{\text{div.}}{\text{mm}} \text{ soit } 0,142 \frac{\mu\mu F}{\text{mm}}.$$

Les chiffres ci-dessus nous montrent qu'en augmentant la fréquence d'une part et la sensibilité du galvanomètre, d'autre part, la sensibilité passe de $13 \mu\mu F$ par millimètre à $0,142$.

Enfin, la figure 27 nous montre trois courbes de résonance qui sont obtenues dans les cas suivants :

a) la courbe (1), le condensateur C_d rempli d'air,

b) la courbe (2), le condensateur C_d rempli de solution de KCl dans l'eau, dont la concentration était $0,00025$ molécules-grammes par litre,

c) la courbe (3), le condensateur C_d rempli de la solution de KCl dans l'eau, dont la concentration était $0,003$ molécules-grammes par litre. Les courbes de résonance sont donc d'autant plus aplaties que le liquide qui remplit le condensateur C_d est plus conducteur.

Pour obtenir de bons résultats de mesure, il est nécessaire d'avoir une stabilité parfaite du spot. Cette stabilité n'est atteinte qu'une heure ou une heure et demie au moins après la mise en fonctionnement des appareils. On doit la conserver pendant toute la durée d'une série de mesures. Aussi faut-il toujours avoir des accumulateurs en très bon état de charge. Cependant, il est très important de ne jamais utiliser les accumulateurs

immédiatement après avoir été chargés car on sait qu'au début de la décharge la force électromotrice d'un accumulateur est supérieure à celle du régime normal.

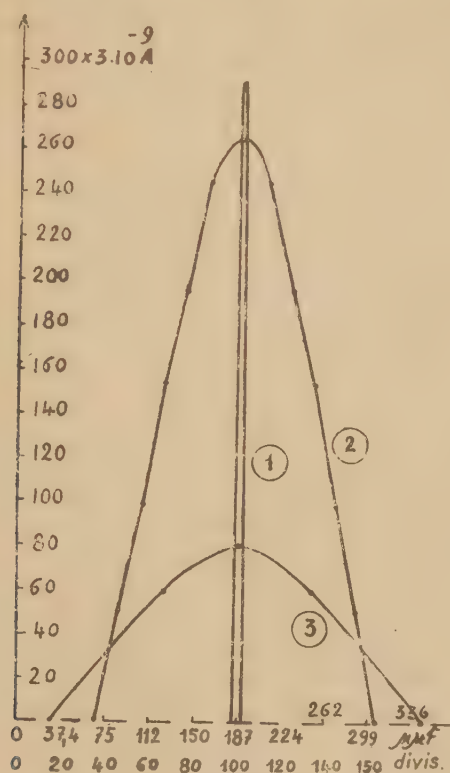


FIG. 27.

Il faut également éviter tout déplacement de personne dans la pièce. Comme un certain nombre de mouvements sont inévitables pour effectuer les lectures, nous avons disposé les appareils de telle façon qu'un mouvement dans le voisinage du circuit de mesure n'ait aucune action sur le spot, alors que le même mouvement effectué auprès de la spire S (fig. 13), qui émet le signal, aurait entraîné un déplacement du spot de deux centimètres environ.

21° **Étalonnage du condensateur contenant le liquide.** — Si le condensateur C_d contenant le liquide est rempli successivement par deux liquides dont les constantes diélectriques sont respectivement ε et ε' , on aura d'après la formule (38) :

$$\begin{aligned} C_{2e} - C_{1e} &= b.s.\varepsilon, \\ C'_{2e} - C'_{1e} &= b.s.\varepsilon', \end{aligned}$$

d'où :

$$\varepsilon = \frac{C_{2e} - C_{1e}}{C'_{2e} - C'_{1e}} \cdot \varepsilon' \quad (44)$$

Si l'on remplace le liquide de la constante diélectrique ε' par l'air, on aura :

$$\varepsilon = \frac{C_{2e} - C_{1e}}{C''_{2e} - C''_{1e}} \quad (45)$$

Les mesures, faites à 16,4° C, donnent quand le condensateur est rempli d'air :

$$\begin{aligned} C''_{2e} - C''_{1e} &> 0,60 \text{ division,} \\ C''_{2e} - C''_{1e} &< 0,65 \text{ division,} \end{aligned}$$

où une division représente 1,87 micro-microfarad. Étant donné la petitesse du nombre mesuré, nous nous sommes livrés à une vérification sur un corps dont la constante diélectrique est connue avec une grande précision : le benzène très pur pour la cryoscopie. Nous prendrons pour la constante diélectrique du benzène [16] le nombre 2,289. D'autre part, nous trouvons pour le benzène :

$$C_{2e} - C_{1e} = 1,40 \text{ division}$$

et la formule (45) nous donne :

$$C''_{2e} - C''_{1e} = \frac{1,40}{2,289} = 0,61 \text{ division}$$

Nous adopterons cette valeur et la constante diélectrique d'un liquide sera donnée par :

$$\varepsilon = \frac{C_{2e} - C_{1e}}{0,61} \quad (46)$$

$C_{2e} - C_{1e}$ étant exprimé en divisions du condensateur étalonné dont l'unité vaut $1,87 \mu\mu F$, ou

$$\varepsilon = \frac{C_{2e} - C_{1e}}{0,61 \cdot 1,87} = \frac{C_{2e} - C_{1e}}{1,14} \quad (47)$$

$C_{1e} - C_{2e}$ étant exprimé en micro-microfarad.

22° La constante diélectrique de l'eau. — Une série de mesure de la constante diélectrique en fonction de la température nous a donné les nombres suivants pour l'eau bi-distillée :

Température en °C :

16,5 20,5 25,3 30,1 35,1 40,0 45,2

[Constante diélectrique :

80,6 80,2 79,3 76,9 76,0 74,5 72,4

Nous remarquons que les valeurs trouvées concordent bien avec les résultats donnés par d'autres auteurs.

23° La constante diélectrique des solutions de sucre dans l'eau. — Nous avons fait des mesures de la constante diélectrique des solutions sucrées en fonction de la température d'une part et de la concentration d'autre part. En désignant par p le nombre de molécules-grammes par 1.000 grammes d'eau, les solutions utilisées étaient :

$p = 0,1, 0,25, 0,50, 0,75$ et $1,00$

Les mesures de la constante diélectrique en fonction de la température ont donné les résultats suivants :

$p = 0,10$ molécule-gramme par kilogramme,

$\Theta^0 =$	16,4	20,2	25,2	30,4	35,0	40,0	44,8
$\varepsilon =$	79,2	78,0	76,4	75,2	73,6	72,0	70,6

$p = 0,25$ molécule-gramme par kilogramme

$\Theta^0 =$	16,2	20,5	25,3	30,2	35,0	40,0	45,0
$\varepsilon =$	77,2	76,0	74,8	73,6	72,4	71,2	69,6

$p = 0,50$ molécule-gramme par kilogramme

$\Theta^0 =$	16,4	20,0	25,0	30,4	35,2	40,0	44,8
$\varepsilon =$	75,6	74,5	73,2	72,0	70,4	69,2	68,0

$p = 0,75$ molécule-gramme par kilogramme

$\Theta^0 =$	17,0	20,1	24,8	30,4	35,2	40,0	45,0
$\varepsilon =$	73,2	72,0	71,2	69,2	68,8	67,6	66,4

$p = 1,00$ molécule-gramme par kilogramme

$\Theta^0 =$	17,0	20,2	24,8	30,4	35,0	40,2	45,0
$\varepsilon =$	70,8	70,4	68,8	68,0	67,2	66,0	64,8

La représentation graphique des nombres ci-dessus est donnée sur la figure 28, où nous avons joint les

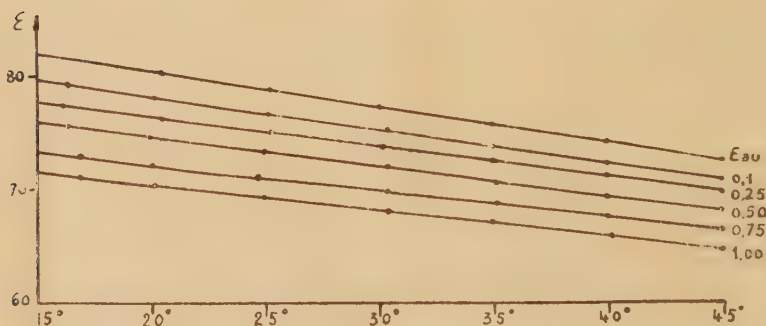


FIG. 28.

nombres correspondant à l'eau pure, ce qui constitue d'ailleurs la concentration zéro du sucre dans l'eau. Les points se placent sensiblement sur une série de droites. La variation de la constante diélectrique en

fonction de la température est donc linéaire, mais est d'autant plus faible qu'on a une concentration plus élevée.

Les mesures de la constante diélectrique en fonction de la concentration ont donné des résultats suivants :

Concentration en mol.-gr. par kilogramme		0	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00
Température	15°	80,9	79,6	77,6	76,0	73,2	71,4
	20°	80,3	78,0	76,3	74,5	72,0	70,2
	25°	79,4	76,6	75,0	73,2	70,8	69,2
	30°	77,8	75,0	73,6	71,8	69,7	68,0
	35°	76,0	73,6	72,4	70,4	68,8	67,2
	40°	74,5	72,1	71,2	69,2	67,4	65,7
	45°	72,6	70,6	69,6	68,0	66,2	64,6

La figure 29 représente graphiquement les résultats correspondants à 20°, 30° et 40°. La pente de ces courbes est plus grande au commencement, c'est-à-dire que l'addition de petites quantités de sucre à de l'eau modifie plus la constante diélectrique que l'addition de même quantité de sucre à de l'eau déjà sucrée.

24° La constante diélectrique des solutions de KCl dans l'eau. — On sait que la constante diélectrique des solutions électrolytiques dans l'eau doit, d'après la théorie de M. Debye [17], diminuer avec l'augmentation de concentration. Cette théorie se vérifie relativement bien pour les concentrations très faibles. Pour les concentrations un peu plus grandes A. Astin [15] a montré que la constante diélectrique de KCl dissous dans l'eau passe par un minimum vers la concentration 0,0005 molécules-grammes par litre et ensuite croît en dépassant la valeur qui correspond au solvant.

Nous avons repris la mesure de la constante diélectrique des solutions de KCl. Le montage utilisé est celui de la figure 16, la fréquence de l'émetteur était 1613 kilo-

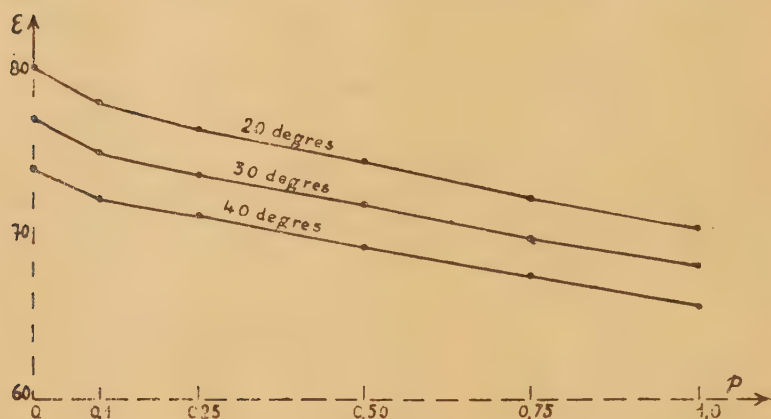


FIG. 29.

périodes par seconde. En exprimant la concentration p en molécules-grammes par kilogramme, nous avons effectué des mesures suivantes :

$p =$	0	0,00025	0,0005	0,001	0,002	0,003
$\epsilon =$	80,6	79,8	79,0	79,8	81,4	83,8

La figure 30 nous en donne la représentation graphique.

En même temps, nous avons tracé le rapport $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$, ϵ^0

étant la constante diélectrique du solvant, en fonction de la concentration. Nous avons rejoint les courbes données par M. Beauvilain [3], courbe (1), et par M. Astin [15], courbe (2). Les mesures de M. Beauvilain étaient faites sur des concentrations allant jusqu'à 0,001 molécules-grammes par litre et il conclut que la constante diélectrique décroît linéairement avec l'augmentation de la concentration. Nos mesures montrent que la constante diélectrique croît même plus rapidement avec l'augmentation de la concentration que dans

les mesures de M. A. Astin. A propos de ce fait, il faut remarquer que les mesures donnent des valeurs d'autant plus petites pour la constante diélectrique que la

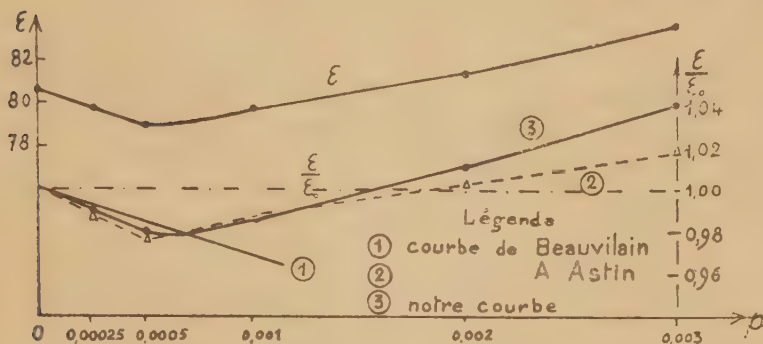


FIG. 30.

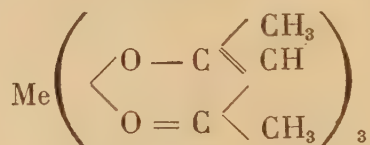
compensation de la self-induction provenant des fils de jonction est moins bien réalisée.

25° La constante diélectrique des solutions d'acétylacétate de néodyme dans quelques solvants organiques. — Les mesures de la constante diélectrique des solutions de l'acétylacétate de néodyme (N_d) n'ont pas encore été faites et il nous a paru intéressant de les effectuer.

M. Urbain [18] a obtenu les acétylacétates en partant des nitrates. Il les a précipités en solution aqueuse très diluée (5 grammes par litre) par l'ammoniac, les a lavés par décantation et leur a ajouté la quantité théorique d'acétylacétate. En chauffant, il a transformé les hydrates en acétylacétates. En refroidissant, ensuite, l'acétylacétate cristallise en petites aiguilles, mais le rendement n'est pas bon. La méthode de Biltz [19] est meilleure. D'après cette méthode G. Gantsch et E. Meyer [20] ont préparé les acétylacétates. On dissout par exemple 3.5 grammes de nitrate double de N_d -ammonium dans 20 centimètres cubes d'eau. On ajoute 3 grammes d'acétylacétone qui est dissous dans

l'eau contenant aussi peu que possible d'ammoniac. L'acétone doit être utilisée immédiatement après sa distillation. On chauffe un peu et on laisse refroidir les cristaux (petites aiguilles qui sont très peu soluble dans l'eau) se précipitent. On les filtre, les lave un peu avec l'eau et après avec l'alcool. On fait la recristallisation dans du tétrachlorure de carbone, parce que c'est un solvant qui ne les décompose pas. Dans le tétrachlorure de carbone, ils sont beaucoup plus solubles à une température élevée. On les sèche au-dessus de l'acide sulfurique.

Les acétylacétonates sont des complexes internes :



Ils sont très peu solubles dans l'eau, mais ils sont plus solubles dans les solvants organiques, ils ne se comportent donc pas comme les autres sels ordinaires.

Nous avons mesuré les constantes diélectriques des solutions d'acétylacétonate de néodyme dans le benzène (C_6H_6), le tétrachlorure de carbone (CCl_4) et l'alcool éthylique ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) en fonction de la concentration. Les concentrations exprimées en molécules-grammes par litre étaient les suivantes : 0,0025, 0,005 et 0,01. L'alcool éthylique provenait du laboratoire de M^{me} Ramart-Lucas spécialement préparé pour les spectres d'absorption, il était de 95 %. Le tétrachlorure de carbone et le benzène (exempt de thiophène) étaient des produits Poulenc pour analyses que nous avons distillés une fois pour être sûrs de leur pureté. Il y a un inconvénient; le corps se précipite après quelques jours quand la concentration est 0,01 molécule-gramme par litre, ce qui veut dire que les solutions étaient saturées à la température ambiante.

Les résultats de mesure sont les suivants

a) dans l'alcool éthylique :

$p =$	0	0,0025	0,005	0,01
$\Sigma =$	29,1	29,5	30,1	31,5

b) dans le benzène :

$p =$	0	0,0025	0,005	0,01
$\Sigma =$	2,289	2,29	2,29	2,28

c) dans le tétrachlorure de carbone :

$p =$	0	0,0025	0,005	0,01
$\Sigma =$	2,25	2,27	2,22	2,27

On voit que les solutions de l'acétylacétone de néodyme dans le benzène et le tétrachlorure ne modifient pas la constante diélectrique du solvant à la précision de mesure près, tandis que les solutions dans l'alcool ont une constante diélectrique qui, paraît-il, croît avec l'augmentation de la concentration. Enfin, rappelons-nous que les moments électriques du benzène et du tétrachlorure de carbone sont zéro et que le moment électrique de l'alcool éthylique est plus grand que zéro.

26° La constante diélectrique de la glycérine en fonction de la température. — M. Nouet a étudié, dans un travail non publié encore, la constante diélectrique de la glycérine et ses mélanges avec l'eau en fonction de la température. Il faisait des mesures pour les températures de 15 à 45°, en utilisant notre montage. Il a montré que les différentes glycérines du commerce contiennent un très grand nombre d'impuretés. Dès qu'il se trouve dans ces glycérines de petites quantités d'eau, ces impuretés s'ionisent, faisant varier ainsi dans de grandes proportions la conductibilité.

M. Darmois nous a suggéré l'idée de mesurer la constante diélectrique de la glycérine en fonction de la température en diminuant la température jusqu'à solidification de celle-ci. Il a surtout attiré notre attention sur le fait que le passage de l'état liquide à l'état vitreux

d'un corps est accompagné par la variation relativement brusque des grandeurs physiques (chaleur spécifique, etc). Les mesures de la constante diélectrique de la glycérine ont confirmé les prévisions de M. Darmois.

Nous avons cherché à nous procurer de la glycérine aussi pure que possible et notre choix s'est fixé sur la glycérine « La Vierge » qui nous a été fournie par les Établissements Billault et dont voici l'analyse :

Glycérine pure : 30°.

Aspect : incolore, limpide.

Solution à 20 % : limpide.

Densité : 1,258 à 19°.

Eau : 1 à 2 %.

Résidu fixe : 0,005 %.

Réaction : neutre.

Métaux lourds : néant.

Fer : 2 mmg. 5 au kilogramme.

Arsenic : 2 milligrammes au kilogramme.

Calcium : néant.

Sulfates : néant sur solution à 20 % en douze heures.

Chlorures : environ 5 milligrammes au kilogramme.

Acroléïne : néant.

Nous avons effectué des mesures pour les températures de — 70° à + 30° et les résultats obtenus sont les suivants :

t =	— 70	— 50	— 40	— 30	— 20
ε =	4,8	5,2	6,4	20,0	38,0
t =	— 15	— 10	0	3,6	7,8
ε =	46,0	49,4	48,2	47,6	46,2
t =	11,4	16,0	20,6	24,4	27,4
ε =	45,8	44,4	43,5	43,0	41,7
t =	34,0	44,8			
ε =	41,0	40,3			

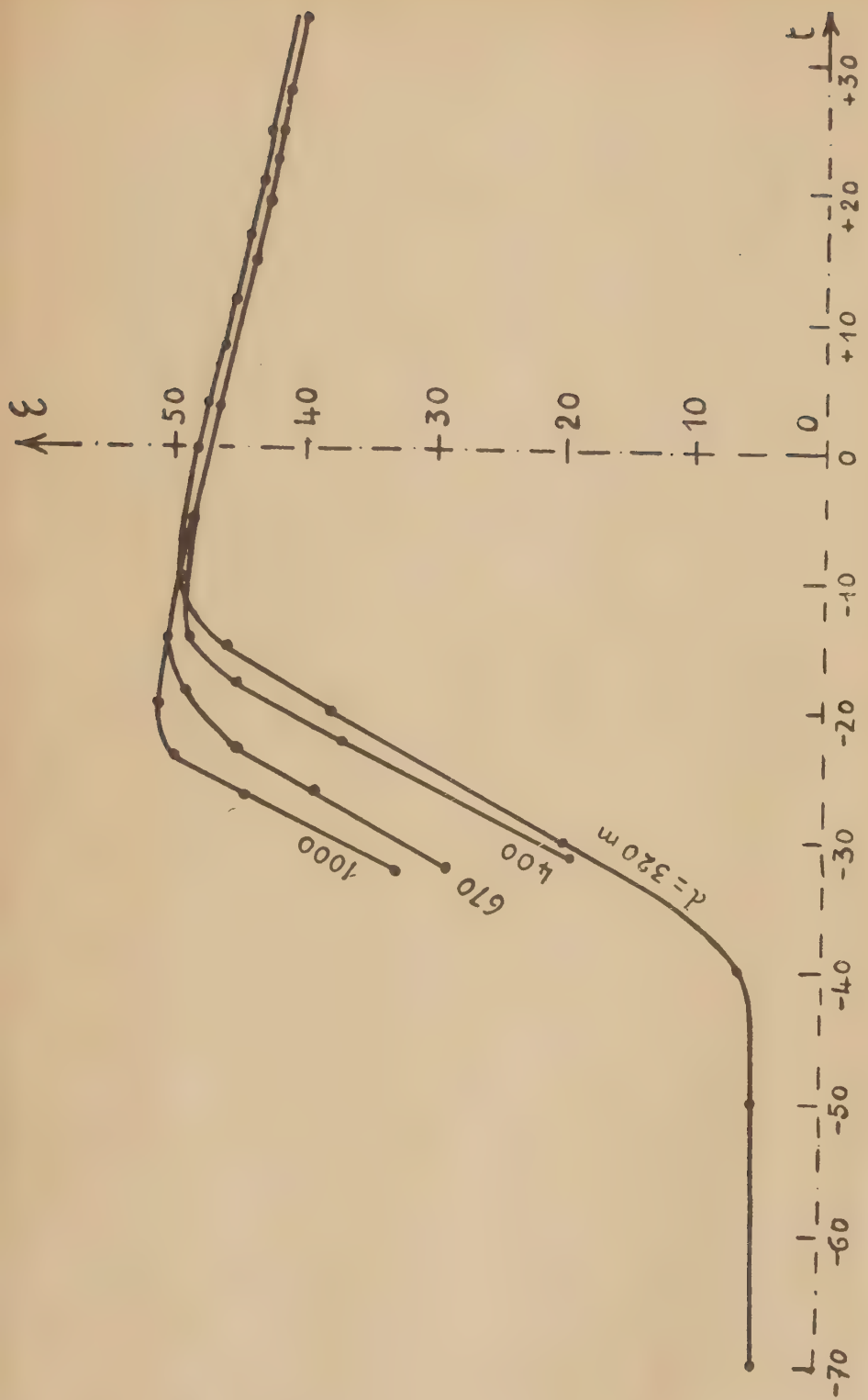


Fig. 31.

Dans l'intervalle de -10° à -40° environ où la constante diélectrique varie rapidement, la glycérine se trouvait dans un état visqueux, ce qu'on constatait facilement en déplaçant l'électrode interne. La viscosité est d'autant plus grande que l'on s'approche de la température -40° , où la glycérine devient solide. C'est justement en déplaçant l'électrode interne que nous nous sommes renseignés si la glycérine était à l'état liquide, l'état visqueux ou l'état solide. La figure 31 donne la représentation graphique de la constante diélectrique de la glycérine en fonction de la température où nous avons rejoint la courbe trouvée par Craffunder [21]. Nous pouvons conclure que la constante diélectrique dépend de la pureté de la glycérine, mais les variations relativement brusques doivent être attribuées au passage de l'état liquide à l'état solide.

Remarquons que la glycérine à l'état visqueux et solide est très mauvaise conductrice de la chaleur; l'équilibre thermique s'obtient après une heure et demie environ.

CONCLUSION

Les faits essentiels du présent travail peuvent être résumés de la façon suivante :

1° Étant donné que le tube électronique n'emprunte presque aucune énergie au circuit oscillant, d'une part, et qu'il est un appareil détecteur très sensible, d'autre part, il s'impose comme indicateur de la résonance de tension d'un circuit oscillant en haute fréquence. Nous croyons pouvoir faire une étude rigoureuse sur le mécanisme de la détection par la courbure de grille d'une lampe à trois électrodes, ce qui est nécessaire pour que l'on puisse se servir correctement du tube électronique comme instrument de mesure;

2° Pour mesurer la constante diélectrique des liquides conducteurs (électrolytes), il est nécessaire de tenir compte de la self-induction provenant des fils de jonction. Nous avons donné un procédé qui permet d'éliminer cette self-induction et ainsi de se dispenser des calculs de la correction qui sont toujours approximatifs et difficiles d'ailleurs;

3° Les mesures de la constante diélectrique des solutions de sucre dans l'eau, en fonction de la température et de la concentration, ont montré que la constante diélectrique décroît à peu près linéairement avec l'augmentation de la température, d'une part, et de la concentration, d'autre part, mais la décroissance en fonction de la concentration est plus grande au début;

4° La constante diélectrique des solutions de KCl dans l'eau décroît avec l'augmentation de la concentration, passe par un minimum vers la concentration

0,0006 molécule-gramme par litre et croît ensuite en dépassant la valeur initiale;

5° La constante diélectrique des solutions de l'acétyl-acétonate de néodyme dans le benzène et le tétrachlorure de carbone ne varie pas avec la concentration, tandis que dans l'alcool méthylique elle croît avec l'augmentation de la concentration;

6° La constante diélectrique de la glycérine subit une variation relativement brusque quand celle-ci passe de l'état liquide à l'état solide.

Ce travail a été exécuté au *Laboratoire d'Enseignement de la Physique*, à la Sorbonne. Nous tenons à exprimer ici notre vive et respectueuse reconnaissance à M. FABRY, qui nous a permis d'y travailler et à M. DARMOIS qui a dirigé nos recherches. Nous remercions aussi MM. BEDEAU, DECOMBE et M^{lle} RADOITCHITCH pour leurs précieux conseils et le personnel du laboratoire, qui nous a efficacement aidés.

BIBLIOGRAPHIE

1. M. JEZEWSKI. — *Zt. f. Phys.*, 48, 1928, p. 123.
2. F. TANK. — *Phys. Zt.*, 17, 1916, p. 114.
3. M. BEAUVILAIN. — *Thèse de Doctorat*, Paris, 1935.
4. G. BRUHAT. — *Cours d'Électricité*, Paris, 1929.
5. R. SEWIG. — *Objektive Photometrie*, p. 80, Berlin 1935.
6. C. GUTTON. — *La lampe à trois électrodes*, p. 18, Paris, 1929.
7. D. MILOSSAVLIEVITCH. — *C. R. Ac. des Sc.*, 202, 1936, p. 472 et 735.
8. JONES et JOSEPHS. — *I. amer. chem. Soc.*, 50, 1928, p. 1049.
9. F. BEDEAU. — *Cours élémentaire de télégraphie et téléphonie sans fil*, Paris.
10. M. BEAUVILAIN. — *Ondes électriques*, 13, 1934, p. 127.
11. R. T. LATEY et O. GATTY. — *Phil. Mag.*, 7, 1929 p. 985.
12. R. T. LATEY, O. GATTY et W. G. DAVIES. — *Phil. Mag.*, 12, 1931, p. 1019.
13. R. T. LATEY et W. G. DAVIES. — *Phil. Mag.*, 12, 1931, p. 1111 et 13, 1932, p. 444.
14. H. KNEIPKAMP. — *Zt. f. Phys.*, 51, 1928, p. 95.
15. A. ASTIN. — *Phys. Rev.*, 34, 1929, p. 300.
16. R. M. DAVIES. — *Phil. Mag.*, 138, 1936, p. 1.
17. DEBYE. — *Polare Molekeln*, Hirzel, Leipzig.
18. URBAIN. — *C. R. ac. des Sc.*, 124, 1897, p. 618.
19. BILTZ. — *Ann. der Chemie*, 331, 1904, p. 334.
20. G. GANTSCH et E. MEYER. — *Ber. der Chem. Geselsch*, 52, 1920, p. 1577.
21. GRAFFUNDER. — *Ann. der Phys.*, 70, 1923, p. 225.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

LES PHÉNOMÈNES
DE MAGNÉTOSTRICTION

Vu et approuvé :

Paris le 27 juin 1936,

Le doyen de la Faculté des Sciences.

CH. MAURAIN.

Vu et permis d'imprimer,

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLETY.

